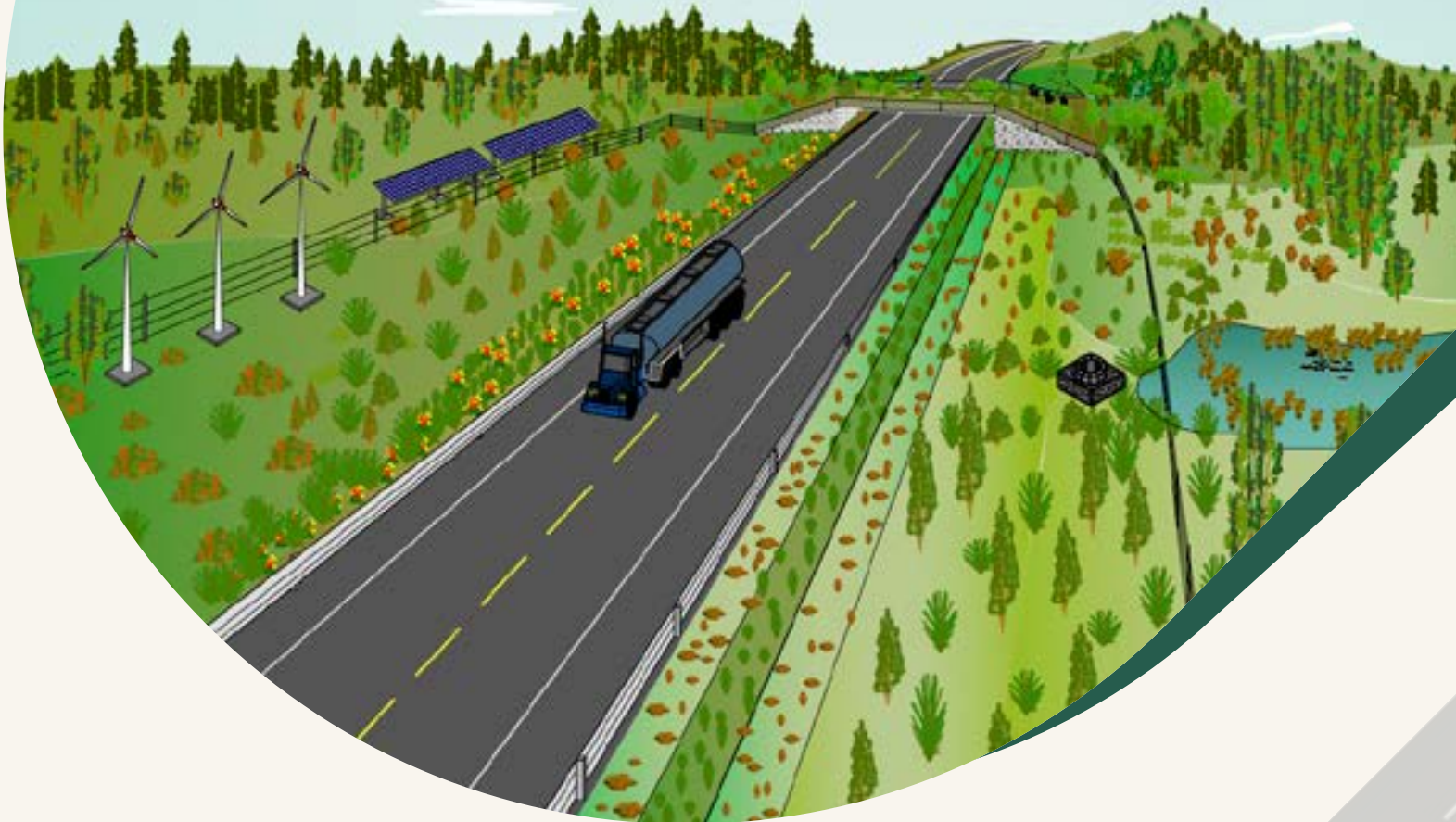




COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

Subsecretaría de Infraestructura



MANUAL DE PLANEACIÓN, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE INFRAESTRUCTURA VERDE VIAL

Dirección General de Servicios Técnicos
Ciudad de México, diciembre 2021
Primera edición

**MANUAL DE PLANEACIÓN,
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE
INFRAESTRUCTURA VERDE VIAL**



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

MANUAL DE PLANEACIÓN, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE INFRAESTRUCTURA VERDE VIAL



La imagen de la portada ilustra conceptualmente una Infraestructura Verde Vial, en la que se busca obtener el máximo provecho del espacio generando servicios ecosistémicos y ambientales en la zona. El diseño de una Infraestructura Verde Vial y la selección de las estructuras que la conforman, debe realizarse con base en estudios técnicos y socioambientales, tomando en consideración los servicios ecosistémicos y las necesidades presentes en la zona.

A la izquierda del esquema se representan componentes de infraestructura verde que brindan a la carretera servicios ambientales como la generación de energía limpia (eólica y solar). En el caso de los paneles solares es importante indicar que para poder llevar a cabo su instalación fuera del derecho de vía, se deberá de realizar previamente la gestión correspondiente con los propietarios de los terrenos a ocupar. Se ejemplifica además el aporte de algunos servicios ecosistémicos de regulación a partir de la conformación de una franja de vegetación con herbáceas y plantas con flor nativas que promueven la infiltración, el control de la erosión y el desarrollo de especies polinizadoras; además de una mejor integración de la infraestructura con el paisaje.

A la derecha de la carretera se representan algunos componentes de aporte de servicios ecosistémicos de provisión de agua, como lo son una cuneta verde paralela a la carretera, un pozo de absorción para facilitar la infiltración y captación de agua y un humedal artificial para almacenarla.

Al fondo se observa un paso inferior para fauna (PIFA) que ha sido provisto de vegetación simulando un corredor ecológico y con cercado que se conecta al derecho de vía para encausar el paso de los animales silvestres.

ISBN: en trámite

Impreso en México
Printed in Mexico

ELABORACIÓN: OCTUBRE 2021
IMPRESIÓN: DICIEMBRE 2021

Queda prohibido, salvo excepción prevista por la ley, la reproducción (electrónica, química, mecánica, óptica, de grabación o fotocopia), distribución, comunicación pública y transformación de cualquier parte de esta publicación –incluido el diseño de cubierta–, sin la previa autorización escrita de los titulares de la propiedad intelectual.

© SICT
Derechos reservados.



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA
DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

OBJETIVOS DE DESARROLLO
SOSTENIBLE

CONTENIDO

MANUAL DE PLANEACIÓN, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE INFRAESTRUCTURA VERDE VIAL

Ing. Jorge Arganis Díaz Leal

Secretario de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes

Ing. Jorge Nuño Lara

Subsecretario de Infraestructura

M.I. Vinicio Andrés Serment Guerrero

Director General de Servicios Técnicos

Ing. Juan Manuel Mares Reyes

Director Coordinador de Desarrollo Técnico



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA
DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

PRÓLOGO

Una de las estrategias con las que el ser humano ha tratado de hacer frente a los acuciantes problemas ambientales es a través de la construcción de infraestructura verde. Esta vía se ha convertido en un pilar para la planificación y gestión territorial mediante soluciones basadas en la naturaleza, así como en la integración entre lo ecológico, lo social y lo económico. La implementación integral de infraestructura verde contribuye a la creciente necesidad de diseñar políticas enfocadas a lograr un equilibrio entre el desarrollo urbano, las demandas socioeconómicas y la protección del ambiente. Es muy importante mencionar que, teniendo en cuenta el Cambio Climático a nivel mundial, es cada vez más difícil concebir el desarrollo tecnológico de un territorio sin una planificación que considere la conservación y la promoción de los servicios ecosistémicos y, por consiguiente, la inversión para la implementación de infraestructura verde.

El presente Manual forma parte de las iniciativas que México promueve para impulsar el desarrollo sustentable abordando nuevas y diversas formas de utilización del espacio a partir de la planificación de la infraestructura vial y considerando estrategias para maximizar la resiliencia de ésta ante los inminentes escenarios de Cambio Climático.

Los impactos ambientales que se generan al construir la infraestructura vial resultan innegables, por lo que es necesario planificar nuevas estrategias que favorezcan la continuidad de los corredores biológicos y su conectividad, así como los beneficios que se obtienen de los ecosistemas. La implementación de infraestructura verde, como un componente más del diseño de los proyectos ejecutivos de la infraestructura vial, resulta una propuesta ambiental y multifuncional para contrarrestar los impactos adversos de las mismas. En este sentido, con la formulación de recomendaciones y lineamientos técnicos aplicables a la infraestructura vial propuestos en este documento, se pretende promover la construcción de Infraestructura Verde Vial; es decir, obras de infraestructura vial sustentables que impulsen no sólo el desarrollo del país en términos económicos y sociales, sino que también promuevan la conservación de los ecosistemas, su biodiversidad y los servicios ecosistémicos que proveen.

Desde el punto de vista jurídico, los ecosistemas deben ser vistos no como un objeto a regular, sino como uno de los valores que sustentan a la vida natural y a la especie humana, por lo que se debe evitar su pérdida y deterioro a través de mecanismos de control y regulación de las conductas y actividades que colaboran en su pérdida y destrucción. Lo anterior, sin duda, es un esfuerzo que debe hacerse de manera colectiva en favor del desarrollo y bienestar de nuestra sociedad y del ambiente.

Este Manual constituye una herramienta de apoyo para la planeación e implementación de Infraestructura Verde Vial y tiene como objetivo coadyuvar en el cumplimiento de los compromisos de México en seguridad vial y en materia ambiental, adhiriendo a acuerdos internacionales como los señalados en la Agenda 2030 en el marco del fomento al desarrollo sostenible. Este documento se alinea a diversos objetivos

tales como: Objetivo 6, garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos; Objetivo 7, garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna; Objetivo 9, construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación; Objetivo 11, lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles; Objetivo 13, adoptar medidas urgentes para combatir el Cambio Climático y sus efectos y finalmente, el Objetivo 15, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.

El presente Manual también se alinea con el acuerdo del Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015-2030, adoptado en la tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas, celebrada en Sendai (Japón), para buscar alternativas para reducir sustancialmente los riesgos de desastres y de las pérdidas ocasionadas por éstos; cumpliendo con la Prioridad 1, comprender el riesgo de desastres; la Prioridad 2, fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo; la Prioridad 3, invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia (a través de medidas estructurales y no estructurales para aumentar la resiliencia económica, social, sanitaria, cultural y del ambiente) y la Prioridad 4, aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y para “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción. La planeación y construcción de Infraestructura Verde Vial permite robustecer las respuestas para enfrentar de mejor manera los fenómenos naturales, reduciendo el riesgo y las pérdidas.

Asimismo, este documento se alinea con los objetivos del Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024, que promueve la implementación de mejores prácticas para el ambiente, cumpliendo el Objetivo Prioritario 1: contribuir al bienestar social mediante la construcción, modernización y conservación de infraestructura carretera accesible, segura, eficiente y sostenible y el Objetivo Prioritario 2: contribuir al desarrollo del país mediante el fortalecimiento del transporte con visión de largo plazo, enfoque regional, multimodal y sustentable, para que la población, en particular en las regiones de menor crecimiento, cuente con servicios de transporte seguros, de calidad y cobertura nacional.



M.I. Vinicio Andrés Serment Guerrero
Director General de Servicios Técnicos

ANTECEDENTES

No cabe duda que la Revolución Industrial y el desarrollo tecnológico han llevado al ser humano a mejorar considerablemente su calidad y tiempo de vida, no obstante, este paso acelerado hacia la evolución técnica también le ha llevado a exceder los límites del equilibrio ecológico. Es así como lo ganado respecto a bienestar, riqueza y calidad de vida se traduce en infinidad de daños que impactan gravemente en los procesos que regulan y mantienen la vida en la Tierra. Este hecho se ha vuelto cada vez más evidente ante la amenaza del Cambio Climático que ha detonado una mayor conciencia y preocupación social, así como una exigencia por adaptar el estilo de vida de las personas a nuevas formas y mejores acciones que consideren la conservación del ambiente del que forman parte.

El inicio de los esfuerzos para revertir el deterioro ambiental data de 1972 con la Declaración de Estocolmo, donde se manifestó por primera vez a nivel global la preocupación por las problemáticas ambientales, sociales y económicas derivadas del modelo tradicional de crecimiento económico y del uso de los recursos naturales. En 1987, con la publicación del informe Bruntland se acuñó el concepto de sustentabilidad y en 1992, la Organización de las Naciones Unidas convocó a la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente y el Desarrollo conocida como la “Cumbre de la Tierra”, en Río de Janeiro, donde el tema ambiental provocó en la mayoría de los países, una intensa discusión sobre el concepto de desarrollo sustentable, el cual se dirige a establecer una interrelación entre los procesos ambientales, sociales y económicos.

Aunque la preocupación ambiental se mantuvo en fuerte auge a nivel global durante casi todo el siglo XX, las políticas de administración de los recursos naturales nacionales se centraron en un enfoque productivo y extractivo. Es así que al día de hoy las estrategias implementadas en México no han logrado frenar las acciones de explotación extensiva y extractiva que son generadas a partir de las prácticas de desarrollo convencional. Por lo tanto, son notorios los graves impactos ambientales y la creciente desigualdad social que se ha generado en torno a ellos (Carabias y Provencio, 2016).

Actualmente, en pleno siglo XXI el desarrollo económico sigue siendo el modelo que guía la toma de decisiones en torno al manejo de los recursos naturales. A pesar de que existe un marco jurídico en materia ambiental que norma la manera en que debe llevarse a cabo cualquier actividad referente al tema, el valor de los bienes y servicios suministrados por los ecosistemas no siempre se incluye en el proceso político de toma de decisiones. Esto, debido a que muchos beneficios no representan aparentemente un valor económico en el mercado o bien, no se conoce con precisión su valor intrínseco en el funcionamiento de los ecosistemas, por lo que su función en pro del beneficio humano llega a ser subestimada (Grêt-Regamey *et al.*, 2008; Westman, 1977).

Es necesario crear un vínculo donde sociedad y naturaleza puedan coexistir poniendo en práctica el concepto de desarrollo sustentable. A partir de esta visión se han creado algunos marcos conceptuales que intentan encaminar con acciones concretas un equilibrio entre las partes. Uno de ellos es el marco conceptual que brinda La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, una iniciativa de la Organización de las Naciones

Unidas que sitúa el bienestar humano como el eje central de la evaluación, aunque reconoce que la biodiversidad y los ecosistemas tienen valores intrínsecos de los cuales depende el bienestar social y por lo tanto, facilita el entendimiento sobre la función e importancia que ejercen los recursos naturales sobre un espacio determinado, con la intención de poder evaluar, gestionar y mejorar el manejo de los ecosistemas en distintas escalas (Millennium Ecosystem Assessment [MA], 2003).

Balvanera *et al.* (2009) resume el panorama conceptual interdisciplinario de investigación científica a nivel global en torno a la evaluación de los servicios ecosistémicos. En términos generales, los servicios ecosistémicos son todos los beneficios que los ecosistemas aportan al bienestar humano y social (Figura 1), ya que se obtienen principalmente de los procesos y funciones ecológicas propias de éstos. Además, los servicios ecosistémicos incluyen las percepciones colectivas de los humanos acerca de su entorno natural y de sus acciones sobre éste, las cuales influyen directamente en la dinámica funcional de los mismos, generan beneficios específicos tanto para las personas y las comunidades que los habitan, como para las comunidades y la sociedad global en general (Balvanera *et al.*, 2009; MA, 2003).

El concepto de servicios ecosistémicos fue aplicado inicialmente a ecosistemas naturales, pero muy pronto su fácil entendimiento y utilidad permitió su extensión a cualquier área verde, entrando aquí, las correspondientes a áreas urbanas como parques, camellones, corredores artificiales, espacios seminaturales, etc. En este sentido, la visión integral que ofrece el enfoque de servicios ecosistémicos ha permitido el desarrollo de nuevas estrategias para combatir los procesos de degradación de los ecosistemas y los socio-ecosistemas. Una de las más recientes, es el concepto de infraestructura verde, cuyo origen revoluciona el entendimiento de cualquier espacio verde y lo refiere en términos generales como una red estratégicamente planificada de áreas naturales y seminaturales con otras características ambientales diseñadas y administradas para brindar una amplia gama de servicios ecosistémicos y a partir de ellos también poder generar servicios ambientales. Sobre este último concepto, se entiende en este documento por “servicios ambientales” a aquellos servicios que no provienen directamente de los ecosistemas, ya que, aunque se obtienen de alguno de los recursos que éstos brindan, se requiere de prácticas tecnológicas y antrópicas para obtenerlos (por ejemplo, la energía eléctrica obtenida a partir de energía solar mediante paneles fotovoltaicos). Por lo tanto, su dependencia yace en torno a los servicios de provisión del ecosistema (Figura 1).

La visión actual del concepto de la infraestructura verde da fuerza al enfoque del arquitecto paisajista y botánico Frederick Law Olmsted, quien afirmaba en 1903 que “ningún parque, por grande y bien diseñado que sea, proporcionaría a los ciudadanos las influencias beneficiosas de la naturaleza [...]. Los parques deberían estar vinculados entre sí y con los vecindarios residenciales circundantes”. Con este concepto se pretende que las áreas verdes urbanas, las zonas agrícolas o socio-ecosistemas, e incluso los parches de polígonos aislados y dispersos de vegetación natural o seminatural, se piensen y evolucionen hacia una planeación integral, cuyo objetivo sea conectar espacios a partir de la restauración de áreas que ofrecen servicios ecosistémicos.

A partir de este enfoque se sustenta el concepto de infraestructura verde, sobre el cual se refiere en el presente Manual como una estrategia para orientar y apoyar la implementación de proyectos de infraestructura vial (entiéndase en este Manual como carreteras y vías férreas) que incorporen iniciativas para la restauración de áreas ver-

des, su conectividad ecológica, así como la conservación y generación de servicios ecosistémicos y ambientales. Es decir, la infraestructura vial como generadora directa de éstos de forma colateral y en beneficio a su utilidad social y económica.

En este Manual el concepto de Infraestructura Verde Vial se usa para referirse a la infraestructura vial que desde etapas tempranas se ha pensado desde el enfoque del desarrollo sustentable y que incorpora consideraciones ambientales en su planeación, diseño, construcción, conservación, operación y monitoreo destinadas a garantizar que la ejecución de cada proyecto de infraestructura vial genere un beneficio ecosistémico y/o ambiental neto positivo, que sea de utilidad social y económica. Aunque la mejor manera de concebir una Infraestructura Verde Vial es desde etapas tempranas, en este Manual es importante concebir que la infraestructura vial existente puede retomar el concepto mediante proyectos de modernización de infraestructura vial y mejorar así la infraestructura, favoreciendo la conectividad ecológica mediante técnicas de Infraestructura Verde Vial.

Figura 1
Servicios que ofrecen los ecosistemas y sus vínculos con el bienestar humano.



Fuente: Modificado de Millennium Ecosystem Assessment, 2003.

Los planes, programas y/o proyectos de la Infraestructura Verde Vial consideran de manera integral elementos ambientales, sociales, económicos y tecnológicos para prevenir, mitigar y corregir (desde una perspectiva de la infraestructura verde) los impactos potenciales ecosistémicos negativos que la infraestructura vial pueda generar.

Por lo tanto, la implementación de Infraestructura Verde Vial puede proporcionar los siguientes beneficios:

- I. Reducir la huella de carbono del sector transporte y mitigar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).
- II. Revertir la fragmentación de los ecosistemas e impulsar la protección de la biodiversidad.
- III. Impulsar la conservación y generación de los servicios ecosistémicos.
- IV. Cumplir con los objetivos de mitigación y adaptación al Cambio Climático y dotar de mayor resiliencia a la infraestructura vial.
- V. Mejorar la integración del uso del suelo “transporte-ecosistema”.

En este sentido, este Manual describe distintos tipos de componentes que pueden ser implementados en una Infraestructura Verde Vial, los cuales, en su mayoría, tienen la cualidad de ser multifuncionales, es decir, que pueden generar más de un beneficio y/o servicio ecosistémico y/o ambiental.

Con relación al listado anterior, a continuación se describen los beneficios que se pueden obtener con la Infraestructura Verde Vial, los cuales serán desarrollados con mayor profundidad más adelante.

I. Reducir la huella del sector transporte y mitigar la emisión de gases de efecto invernadero.

El consumo de energía fósil en la infraestructura vial también está asociado a la emisión de los gases de efecto invernadero, conocidos como GEI, los cuales atrapan el calor en la atmósfera. La mitigación del flujo de estos gases puede lograrse, ya sea reduciendo las fuentes de generación, por ejemplo, la quema de combustibles fósiles para generar electricidad, o conservando y mejorando los “sumideros” que acumulan y almacenan estos gases.

Las marismas, los humedales, el suelo, los bosques y los océanos desempeñan un papel crucial en la absorción y almacenamiento de carbono (representan sumideros de carbono) y, por lo tanto, ayudan a reducir el Cambio Climático. Actualmente, los ecosistemas terrestres y marinos absorben aproximadamente la mitad de las emisiones de CO₂ que genera la humanidad.

En este sentido, la Infraestructura Verde Vial ofrece alternativas para el secuestro de carbono y, en general, para reducir y mitigar los GEI. Algunas alternativas se mencionan a continuación.

a) Secuestro de carbono a través de la vegetación.

Los árboles y otros tipos de vegetación al crecer absorben CO₂. Un árbol grande y viejo puede almacenar alrededor de 3 toneladas de carbono en el tallo, las ramas y las raíces (Pauleit et al., 2013). Una de las principales medidas para mitigar los GEI, es incrementar la cubierta vegetal en las áreas disponibles dentro de la Infraestructura Verde Vial y, además, mejorar las condiciones del suelo para que éste pueda atrapar más carbono.

b) Sistemas de generación de energía renovable.

A partir del Acuerdo de París para restringir el aumento de la temperatura global a 2°C, se buscan alternativas para alcanzar la eficiencia energética y actualizar el suministro de energía con mayor aporte por parte de las energías renovables. En la infraestructura vial existe un área de oportunidad para el uso de energías renovables que ayuda a contribuir al desarrollo de sistemas de transporte sustentables.

- **Sistemas de generación de energía solar.**

Existen tecnologías que permiten instalar sistemas de generación de energía a través de paneles solares en sitios como carreteras, banquetas y ciclovías. Anteriormente los costos eran altos, por lo que únicamente se habían implementado en diversos sitios de manera experimental. Actualmente, el precio de instalación ha disminuido considerablemente y su eficiencia se ha elevado haciéndolos más rentables como una opción a considerar en zonas remotas.

El objetivo de capturar dicha energía es proveer el suministro para la iluminación pública y la señalización vial, sin la utilización de energía fósil, con lo cual se reduce la huella de carbono de la Infraestructura Verde Vial. Algunos ejemplos de su incorporación en carreteras se muestran en las siguientes Figuras:

Figura 2
Ejemplo de paneles solares en carreteras de Francia.



Fuente: Tomado de <https://interestingengineering.com/6-examples-of-solar-powered-roads-that-could-be-a-glimpse-of-the-future>

Figura 3
Ejemplo del uso de paneles solares para la iluminación y suministro de electricidad en carreteras de Italia.



Fuente: Tomado de <https://www.nobbot.com/futuro/carretera-solar/>

- **Sistemas de generación de energía eólica.**

Actualmente se han implementado en diversos países turbinas eólicas para la generación de energía eléctrica en las carreteras, ya sea al centro, a un costado o en la parte superior, las cuales utilizan la fuerza del viento de los vehículos que circulan en las vías, así como el viento del sitio, cuyo empuje permite producir gran cantidad de energía. La generación puede ser híbrida, esto es, integrada por un generador eólico y uno solar.

Al igual que los casos anteriores, la energía puede ser utilizada para abastecer las necesidades energéticas de la Infraestructura Verde Vial.

Figura 4
Generación de energía eólica y solar en carreteras del Reino Unido.



Fuente: Tomado de [//www.leadingedgepower.com/case-studies/le-300-powers-road-signs-for-westcotec.html](http://www.leadingedgepower.com/case-studies/le-300-powers-road-signs-for-westcotec.html)

Figura 5
Generación de energía eólica en vías férreas.



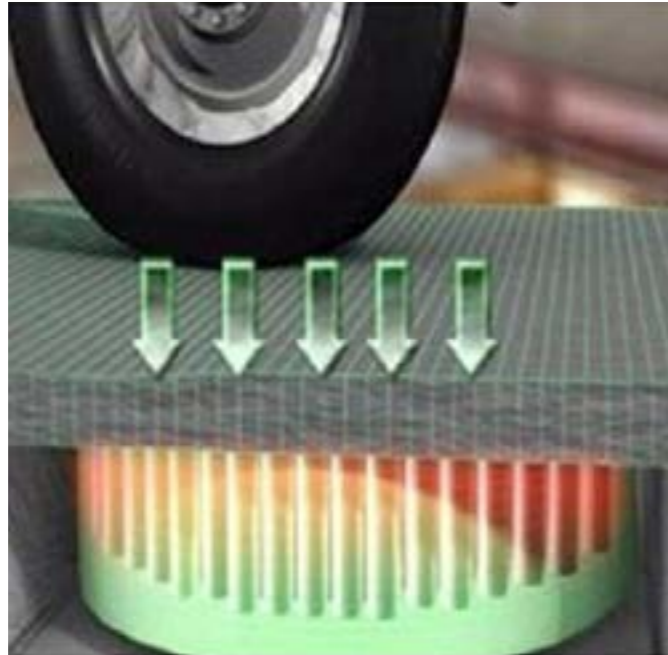
Fuente: Tomado de <http://www.anu-co.com/railroad.html>

- **Sistemas de generación de energía piezoeléctrica.**

La energía piezoeléctrica es energía eléctrica que se genera con la vibración de los vehículos, transformando la energía de la vibración al colocar transductores piezoeléctricos a lo largo del arroyo vial o en la superestructura del ferrocarril. La energía eléctrica obtenida puede ser almacenada y utilizada para las necesidades de operación del sistema de transporte.

Figura 6

Esquema de generación de energía piezoeléctrica.



Fuente: Tomado de <https://www.21stcentech.com/energy-update-heard-piezoelectricity-electricity-feet/>

Los dispositivos piezoeléctricos se pueden incrustar en banquetas, en el arroyo vial, en reductores de velocidad y en vías férreas para transformar la energía cinética de los vehículos o ferrocarriles que pasan en una corriente eléctrica. A diferencia de otras fuentes de energía renovable, la tecnología piezoeléctrica se integra con la infraestructura existente y no requiere espacio adicional. Actualmente esta tecnología se encuentra en desarrollo y representa una oportunidad para el futuro a corto plazo.

II. Revertir la fragmentación de los ecosistemas e impulsar la protección de la biodiversidad.

La expansión de las redes de la infraestructura vial tiende a fragmentar los ecosistemas naturales, lo que genera impactos adversos sobre la biodiversidad. La implementación de Infraestructura Verde Vial permite promover la conectividad de los ecosistemas a través de componentes como son las áreas verdes de los corredores ecológicos y los pasos para fauna como corredores artificiales.

- **Pasos para fauna para la reducción de la fragmentación de ecosistemas.**

Los pasos para fauna silvestre son componentes de la Infraestructura Verde Vial que permiten reducir la fragmentación de los ecosistemas, al promover la conectividad de éstos (incluyendo la vegetación en algunos tipos de pasos para fauna) y proveer sitios de cruce para diversas especies de fauna, con ello, además, se pretende disminuir las colisiones vehículo-animal y el atropello de fauna.

Figura 7

Pasos de fauna para vertebrados acuáticos y terrestres.



Fuente: Tomado de Dirección General de Servicios Técnicos, 2020.

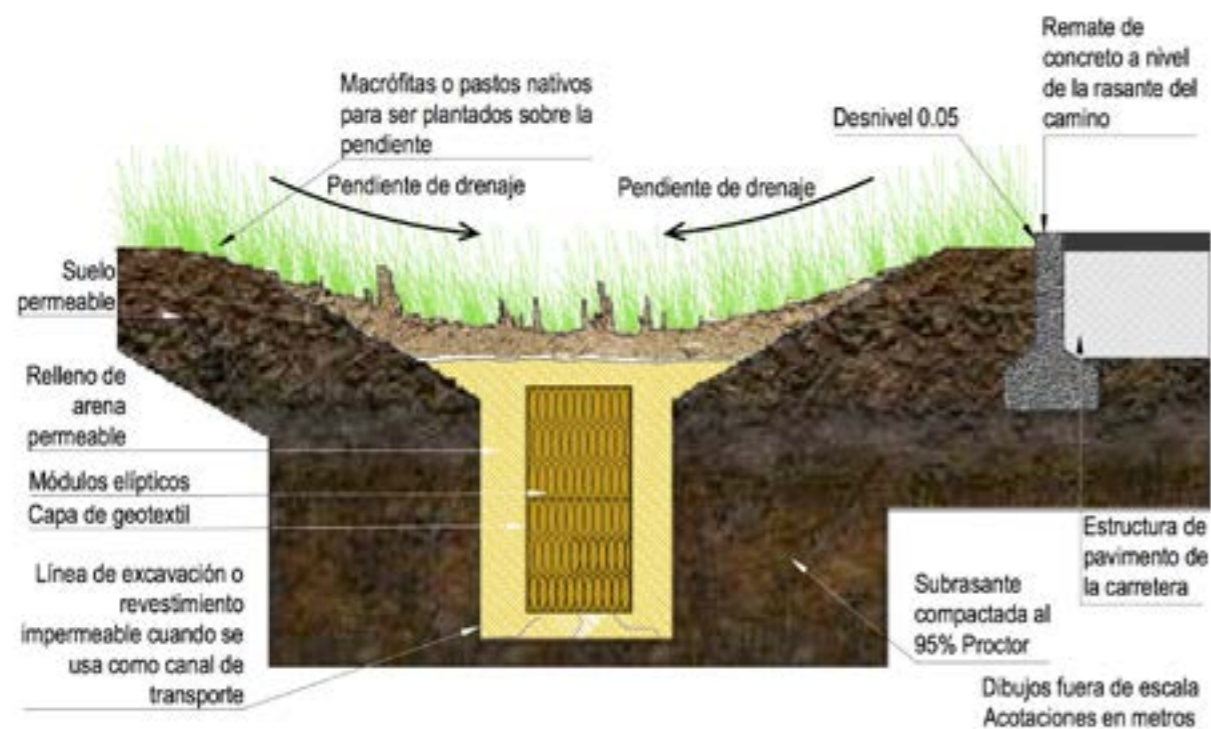
III. Impulsar la conservación y generación de los servicios ecosistémicos.

- **Estanques y humedales para la purificación del agua.**

Uno de los servicios ecosistémicos es la depuración del agua. Mediante la implementación de sistemas de biorretención como los estanques y humedales, se realiza un proceso mediante el cual los contaminantes y los sólidos sedimentados se eliminan de la escorrentía pluvial al pasar por la vegetación y materiales de distintas granulometrías y composición. Asimismo, esta técnica es ampliamente aplicada en los sistemas de drenaje de las vías de comunicación para controlar la calidad del agua antes de su vertido al ambiente y teniendo como beneficio adicional la reducción de las inundaciones.

Existen distintas configuraciones de sistemas de biorretención, en uno de ellos, como se muestra en la Figura 8, el agua de lluvia es drenada a un sistema de biorretención junto al acotamiento de las vías, o en los camellones centrales en caminos divididos de cuerpos separados.

Figura 8
Sistema de biorretención en vialidades.



Fuente: Tomado de <http://www.connectionnewspapers.com/news/2012/may/23/street-runs-through-it/>

IV. Cumplir con los objetivos de mitigación y adaptación al Cambio Climático y dotar de mayor resiliencia a la infraestructura vial.

Actualmente existen estrategias que han demostrado su eficacia para reducir o minimizar el impacto de los inminentes cambios y fenómenos climáticos derivados del calentamiento global sobre la infraestructura vial. En este sentido, con la Infraestructura Verde Vial se puede lograr:

a) Gestionar el riesgo de inundación.

Debido al Cambio Climático se espera un incremento de la precipitación en algunas regiones, derivado de más tormentas severas e intensas, huracanes y tormentas tropicales, frentes fríos acompañados de lluvia, etcétera.

La Infraestructura Verde Vial puede ayudar a reducir las inundaciones localizadas y fluviales al absorber las precipitaciones, evitando colapsar los sistemas de drenaje pluvial existente en la infraestructura vial. Esto no sólo significa una reducción del riesgo de inundaciones *per se*, sino que también permite evitar el daño de la Infraestructura Verde Vial ante eventos extremos.

Algunos ejemplos de componentes que persiguen este objetivo son los siguientes:

- **Pavimentos permeables.**

Los pavimentos permeables permiten la infiltración, el tratamiento y/o el almacenaje de agua proveniente de las lluvias. Pueden estar hechos de concreto permeable, de una mezcla asfáltica de granulometría abierta para permitir porosidad o de adoquines entrelazados y permeables. Esta práctica es recomendable en zonas de inundaciones o donde el acumulamiento de agua resulta en un problema.

Estos pavimentos permeables pueden ser integrados en la construcción de carreteras para proveer un drenaje natural en combinación con materiales porosos, adoquines permeables, y también pueden ser utilizados en calles, estacionamientos y áreas de servicios. Su implementación ha demostrado aumentar la capacidad de recarga de aguas pluviales en vialidades urbanas, las cuales de manera convencional suelen representar áreas impermeables que impiden la recarga de agua a los acuíferos.

- **Acotamientos permeables.**

Las principales funciones de los acotamientos son: proveer una zona de seguridad para los conductores de una carretera, proporcionar una mejor visión de la vialidad, evitar la erosión de la calzada, facilitar los trabajos de conservación de las carreteras, etcétera.

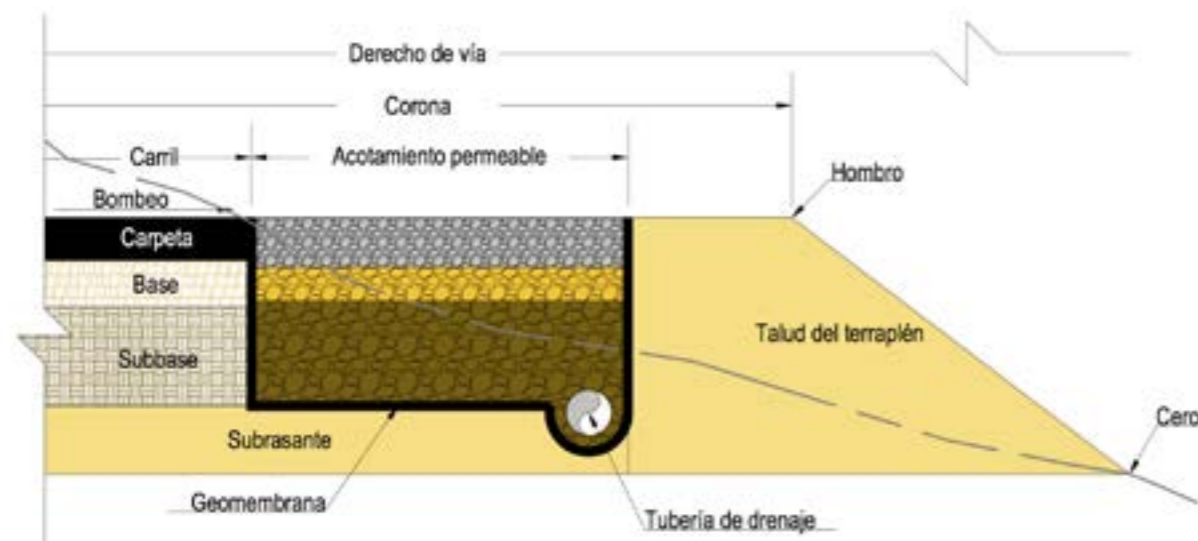
En años recientes se ha recomendado que, si las condiciones del tránsito lo permiten, se construyan acotamientos permeables, es decir, hacer uso del diseño y cons-

trucción de un pavimento permeable en dicha franja de la carretera, cuya función será aportar beneficios significativos para la gestión del agua de lluvia.

Para la implementación de acotamientos permeables se requiere considerar tanto el diseño estructural como el cálculo hidrológico. El primero lo determinan las cargas del tránsito vehicular (daños a la fatiga o la deformación permanente), y el segundo, el diseño hidrológico (coeficiente de infiltración, precipitación, intensidad de lluvia, etcétera.).

Un diseño de acotamiento permeable completo debe incluir detalles de diseño sobre las ubicaciones y el espaciamiento de los puntos de descarga de aguas pluviales, tal como se aprecia en la Figura 9.

Figura 9
Acotamientos permeables.



Fuente: Tomado de <http://conf.tac-atc.ca/english/annualconference/tac2014/s-38/schaus.pdf>

- **Cunetas verdes.**

Las cunetas verdes son obras de drenaje cuyo objetivo es captar agua en las carreteras y así rebajar el nivel freático, estas consisten en zanjas paralelas a la dirección de la vía, en donde se colocan materiales permeables (principalmente agregados pétreos, y pueden acompañarse de geotextiles o geomallas) sobre una tubería con perforaciones para captar el agua e impedir que alcance la estructura del pavimento.

Este tipo de obras de retención de agua permiten su acumulación y favorecen el desarrollo de la vegetación sobre las cunetas, lo que también redundará en mayor retención de agua.

La Figura 10 muestra el ejemplo de un subdren en construcción, sobre el cual se puede implementar una cuneta verde.

Figura 10
Construcción del subdren longitudinal.



Fuente: Tomado de <https://www.cuevadelcivil.com/2014/09/subdrenes-o-drenes-horizontales.html>

La Figura 11 muestra una vista de la cuneta verde terminada y funcionando, eso incluye la implementación de vegetación de pequeña altura que no obstruya la visibilidad en el camino.

En el Reino Unido, este tipo de subdrenes se han diseñado también para funcionar como filtros de contaminantes producidos en las vialidades por el paso de los vehículos, tales como son los residuos de las llantas o de combustibles que, al mezclarse con el agua de lluvia, la contaminan, este diseño se muestra en la Figura 12. El tipo de materiales a utilizar en este tipo de componentes deberá considerar aquellos disponibles en cada zona.

Figura 11
Cuneta verde.



Fuente: Tomado de <https://www.salixrw.com/suds-drainage-channels/large-green-swale/>

Figura 12
Esquema de cuneta y su conformación.



- **Canales secos con presas de control.**

Las presas de control o retención están diseñadas como trincheras, las cuales permiten contener los escurrimientos de agua, disminuir la velocidad del flujo y captar materiales. Por un lado, captan agua y permiten su infiltración, y por el otro evitan acumulación de agua y material sobre la calzada de un camino.

Su diseño implica la construcción de canales secos con presas lineales perpendiculares al escurrimiento de agua en laderas grandes y poco pronunciadas. Se les denomina "canales secos", puesto que su función es operar únicamente en temporada de lluvias y en escurrimientos superficiales e intermitentes, ya que es solo en esta temporada cuando puede existir una acumulación de agua.

Figura 13
Canales secos con presas de control.



Fuente: Tomado de https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Infiltration_trench_combined

B) Resiliencia a la sequía.

En algunas regiones se espera que la precipitación disminuya, por lo que la construcción de sistemas que permitan capturar el agua ofrece un aumento significativo de resistencia a la sequía. La Infraestructura Verde Vial permite coleccionar, retener, almacenar e infiltrar el agua, con lo cual es posible favorecer la recarga de los mantos acuíferos y aliviar el estrés en el suministro de agua de manera local.

- **Cuencas de retención.**

Una cuenca de retención es un embalse construido que captura, almacena e infiltra temporalmente el volumen de agua que escurre de una vialidad (Figura 14). Son sistemas de drenaje sustentable que consisten en depresiones ajardinadas que normalmente están secas, excepto durante e inmediatamente después de una tormenta. El principal objetivo es regular eventos de lluvias extraordinarias y así evitar inundaciones y daños a la infraestructura vial u otros componentes de la Infraestructura Verde Vial.

Figura 14
Cuencas artificiales para retención de agua.



Fuente: Tomado de https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Infiltration_trench_combined

C) Regulación de la temperatura y el ruido mediante revegetación de áreas.

Los cambios en los microclimas y el aumento de temperaturas en ciertas regiones del planeta a raíz del Cambio Climático son problemáticas severas por las cuales es necesario realizar acciones para disminuir las altas temperaturas y las islas de calor.

Algunas de las estrategias que se implementan para regular la temperatura y el ruido implican vegetar el entorno de la infraestructura vial para reducir la intensidad y los efectos de las ondas de calor, desviando la radiación solar y liberando humedad a la atmósfera. De manera adicional, la vegetación ayuda a reducir los niveles de ruido en las carreteras, sin embargo, se deben considerar diversas características como son el tamaño y el follaje, para no interferir con la visibilidad de la vía.

La vegetación provee, además, servicios ecosistémicos como es la captación de agua, captación de CO₂, retención de suelos, generación de materia orgánica para suelos, dosel de protección contra inclemencias climatológicas, provisión de alimento para fauna, protección y resguardo, sitios de percha y como elemento paisajístico fundamental para una buena calidad del entorno.

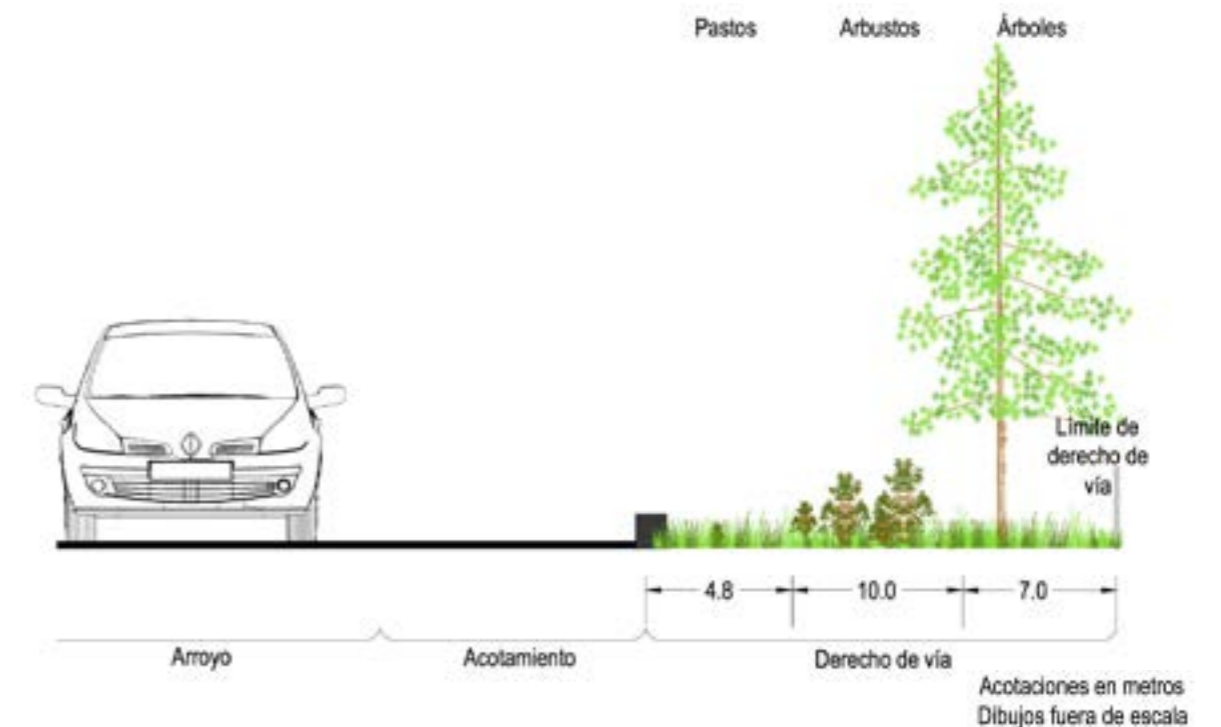
En las siguientes Figuras se presenta un ejemplo de cómo se puede incorporar la vegetación en sus diferentes estratos, los cuales pueden variar y deben ajustarse al tipo de vegetación preponderante por donde cruza el trazo de la carretera, fomentando la distribución de la flora nativa.

Figura 15
Bosque artificial de Uverito, Venezuela, creado para reducir las altas temperaturas y mejorar el paisaje.



Fuente: Tomado de <https://muhimu.es/medio-ambiente/proyectos-reforestacion-mas-extraordinarios-realizados/>

Figura 16
Tipo de vegetación y su ubicación junto a una vía.



Fuente: Modificado de https://www.researchgate.net/publication/326543345_Integrated_Roadside_Vegetation_Management_along_the_Highways_of_Nepal/figures?lo=1

V. Mejorar la integración del uso del suelo “transporte-ecosistema”.

Un aspecto fundamental para el desarrollo armónico de un proyecto de infraestructura verde, y en específico en materia de aprovechamiento máximo del espacio, considerando el suelo como un bien natural no renovable y base de los servicios ecosistémicos, es la incorporación de una planeación estratégica basada en el principio de prevención (evitando incurrir en espacios de alto valor socioambiental) desde el momento de la concepción de la Infraestructura Verde Vial. De aquí deriva el éxito para que un proyecto de infraestructura vial pueda, o no, ser sustentable y sobre todo funcional de acuerdo con los objetivos de la infraestructura verde.

Asimismo, para ejercer una adecuada planeación es necesario responder de manera cualificada a la realidad de las iniciativas de desarrollo urbano, a través de propuestas que ayuden a mantener un orden en el espacio que se pretende construir y que vayan desde lo más especulativo, como el crecimiento de las ciudades en torno a polos de desarrollo; las afectaciones inmediatas (servicios ecosistémicos que serán afectados) y las estrategias necesarias para evitar los impactos o para proponer su mitigación hasta la generación de herramientas de diseño para las políticas institucionales administrativas, que en conjunto colaboren con el fin de paliar el crecimiento anárquico y subdesarrollado del espacio que afecta a la larga el ambiente, el hábitat humano y por consiguiente, la sustentabilidad del mismo.

Para lograr un ordenamiento armónico entre el transporte y los ecosistemas, es fundamental la coordinación desde los tres órdenes y poderes de la administración pública de los bienes nacionales y por supuesto, la coordinación con la creciente participación ciudadana en la toma de decisiones. Esto se plantea así, dado que la construcción de un proyecto de Infraestructura Verde Vial se conforma de varias obras o componentes que constituyen un sistema, es decir, un tipo de Infraestructura Verde Vial puede estar compuesta de pasos para fauna, drenes filtrantes, cunetas verdes, paneles solares, etc., componentes que actúan como una unidad y de acuerdo con la vocación del ecosistema, para ayudar a recuperar en la medida de lo posible los servicios ecosistémicos afectados. Al ser un proyecto integral, la Infraestructura Verde Vial requiere la participación de todos los entes antes mencionados, con el objetivo de generar entre ellos responsabilidad, identidad y apropiación de los proyectos para que éstos permanezcan a lo largo del tiempo y brinden los beneficios esperados. En el Capítulo 7 de este Manual se puede consultar un ejemplo de integración entre ecosistemas y transporte.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la infraestructura a nivel mundial avanza a un ritmo acelerado. El Foro Económico Mundial estimó que para el 2030 la infraestructura mundial aumentará un 32% (correspondiente a una inversión de 90 trillones de dólares), del cual, el mayor incremento corresponderá a la infraestructura vial y a la expansión urbana. Por lo que, en cohesión al concepto de la Infraestructura Verde Vial, las agendas internacionales buscan servir a varios objetivos en una misma zona compensando el costo ecológico de las actividades humanas (Mell, 2008).

En México, la infraestructura vial conforma una red de carretera nacional con una extensión total de 407,958 km, integrada por autopistas, carreteras, caminos rurales y brechas. De esta red, 51,197 km de carreteras y autopistas son federales (SCT-DGP, 2020).

Al respecto, es necesario que la infraestructura vial en México sea planeada y/o ejecutada ante algún marco de infraestructura verde. En México la mayoría de los estudios y manuales desarrollados con respecto a la infraestructura verde están centrados en las ciudades (Álvarez, 2017; Banco de Desarrollo de América del Norte [BDAN], 2017; Murrieta, 2016; Quiroz-Benítez, 2018; Suárez, 2011; Urbanería, 2021; Villalobos, 2019) y en realidad, hay muy poco trabajo de investigación sobre la implementación de Infraestructura Verde Vial, no obstante, considerando los problemas ambientales que se viven a nivel global, es importante implementar prácticas sustentables en todos los proyectos de desarrollo, en este caso incluyendo los correspondientes al diseño y construcción de infraestructura vial.

Aunado a lo anterior, es necesario también diseñar, crear e implementar políticas públicas que ayuden a mejorar las prácticas de vinculación entre el ambiente y sociedad, a través de soluciones sustentables.

Ante la creciente necesidad de contar con una mayor conciencia ambiental y, por lo tanto, de implementar en los proyectos los conceptos y fundamentos del desarrollo sustentable, la infraestructura verde se ha convertido en una base de planeación y gestión territorial cuyo objetivo es brindar soluciones naturales para integrar los aspectos ecológicos, sociales y económicos en proyectos de desarrollo.

En el sentido del párrafo anterior, el presente Manual forma parte de los primeros en su materia que intenta integrar dentro de la planeación de la infraestructura vial, prácticas encaminadas a fortalecer el desarrollo sustentable en el país a partir de un enfoque ecológico en su diseño y construcción.

Para ello, el presente Manual se ha dividido en siete capítulos que se describen a continuación.

El Capítulo 1: “Conceptos generales sobre infraestructura verde” presenta el marco conceptual a partir del cual se fundamenta este Manual y la dirección que pretende tomar en el análisis de la Infraestructura Verde Vial. Se explican los conceptos fundamentales, entre ellos infraestructura verde, Infraestructura Verde Vial y servicios

ecosistémicos. Se cierra con un breve contexto del marco regulatorio sobre el cual se sustenta la Infraestructura Verde Vial.

El Capítulo 2: “Planeación: Identificación de las necesidades y oportunidades para implementar Infraestructura Verde Vial” integra los procedimientos y criterios que hoy en día se utilizan con mayor frecuencia para evaluar el espacio a partir de un marco de ordenamiento territorial. Se brindan algunos lineamientos y metodologías para evaluar el espacio desde lo ambiental, social y en términos de servicios ecosistémicos.

El Capítulo 3: “Tipos de componentes de la Infraestructura Verde Vial” ofrece alternativas sobre distintos tipos de componentes o estructuras que pueden formar parte de una Infraestructura Verde Vial. Se define y explica su aplicación y relevancia en términos de servicios ecosistémicos y ambientales, así como las ventajas y desventajas de su aplicación.

En el Capítulo 4: “Diseño y construcción de la Infraestructura Verde Vial” se presentan los diseños “tipo” de los componentes de la Infraestructura Verde Vial con criterios, consideraciones y recomendaciones para su construcción y diseño. Lo anterior se presenta además con planos orientativos.

El Capítulo 5: “Metodología de operación y conservación de los componentes de la Infraestructura Verde Vial” contiene recomendaciones sobre las acciones esenciales para conservar las cualidades operativas de la Infraestructura Verde Vial a lo largo del tiempo y, de esta forma, garantizar que brinde los servicios ecosistémicos y ambientales para los que fue diseñada.

En el Capítulo 6: “Metodología de monitoreo de los componentes de la Infraestructura Verde Vial” se presentan los métodos y procedimientos para el seguimiento y evaluación del funcionamiento de los componentes de la Infraestructura Verde Vial, con algunas alternativas para el monitoreo e indicadores de la eficiencia.

Finalmente, el Capítulo 7: “Caso de estudio: integración del concepto de la Infraestructura Verde Vial a nivel de paisaje” da cierre al Manual con un caso de estudio sobre la manera en la que debería de ser implementada la Infraestructura Verde Vial en su conjunto de estrategias, y lo hace sobre un hipotético caso de construcción bajo un enfoque de Infraestructura Verde Vial del parador de servicios próximo a la caseta de cobro de Palmillas, en la carretera federal 57D México-Querétaro. Se expone la manera en la que este parador fue construido, los problemas ambientales generados en su entorno, y cómo sería un escenario ideal de planeación y diseño del parador de haber sido realizado bajo el enfoque de Infraestructura Verde Vial.

OBJETIVOS DEL MANUAL

Objetivo general

Establecer lineamientos y recomendaciones para la planeación, diseño e implementación de Infraestructura Verde Vial en México, con la finalidad de que se desarrollen en el marco de la sustentabilidad y a partir de un enfoque ecológico de la construcción basado en la importancia de los servicios ecosistémicos.

Objetivos particulares

- Desarrollar una guía metodológica para llevar a cabo la planeación de la Infraestructura Verde Vial.
- Establecer lineamientos técnicos para diferentes tipos de componentes que conforman una Infraestructura Verde Vial, para orientar su diseño y construcción.
- Mencionar recomendaciones para la operación y la conservación de la Infraestructura Verde Vial.
- Proporcionar técnicas y procesos de monitoreo que deberán ser ejecutados posteriormente a la construcción de la Infraestructura Verde Vial.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA
DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

ALCANCES

Integrar los criterios y mejores prácticas nacionales e internacionales en materia de Infraestructura Verde Vial, así como todos aquellos aspectos que puedan guiar a su correcta implementación, tomando en cuenta lo siguiente:

- **PLANEACIÓN:** presentar lineamientos técnicos para la planificación de la Infraestructura Verde Vial.
- **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN:** brindar especificaciones técnicas acompañadas de planos conceptuales, diseños esquemáticos y fotografías, para el diseño y construcción de la Infraestructura Verde Vial. Asimismo, indicar algunos componentes que permiten mejorar las condiciones de la infraestructura vial existente y adecuarla como una Infraestructura Verde Vial.
- **OPERACIÓN Y CONSERVACIÓN:** determinar actividades, insumos y periodicidad de acciones para la operación y conservación de la Infraestructura Verde Vial.
- **MONITOREO:** determinar las actividades, los insumos y la periodicidad de las acciones para el monitoreo y evaluación de la eficiencia y eficacia de la Infraestructura Verde Vial.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA
DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

CAPÍTULO 1 CONCEPTOS GENERALES SOBRE INFRAESTRUCTURA VERDE

Generalidades

La infraestructura verde es un concepto cada vez más utilizado, su descripción más reconocida se refiere a *“la red de áreas naturales y seminaturales, las características y espacios verdes en áreas rurales, urbanas, terrestres, de agua dulce, costeras y marinas, que en conjunto mejoran la salud y la resiliencia de los ecosistemas, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad y beneficiando a las poblaciones humanas a través del mantenimiento y mejora de los servicios de los ecosistemas. La infraestructura verde se puede fortalecer a través de iniciativas estratégicas y coordinadas centradas en mantener, restaurar, mejorar y conectar áreas y características existentes, así como en crear nuevas áreas ecológicas”* (Naumann et al., 2011). Hasta hoy, este es el concepto más aceptado y completo sobre infraestructura verde, sin embargo, en la literatura existen varias descripciones.

Entre toda la literatura consultada sobre infraestructura verde, los elementos de conectividad ecológica y multifuncionalidad son una constante (Benedict y McMahon, 2002; Comisión Europea [CE], 2013; Mell, 2010; Minixhofer y Stangl, 2021; Naumann et al., 2011; The Environment Partnership [TEP], 2005; Valdés y Foulkes, 2016). La conectividad ecológica consta de dos componentes, el estructural y el funcional. La conectividad ecológica estructural, equivalente a la continuidad del hábitat, estudia el paisaje de manera estática, independientemente de los atributos de los organismos que lo habitan (CE, 2013), mientras que el componente funcional es dinámico, lo que significa que expresa cómo los paisajes interactúan con las diversas especies que lo habitan o transitan (Saura et al., 2013).

Por su parte, la multifuncionalidad se refiere, como su nombre lo indica, a múltiples funciones y beneficios que la infraestructura verde proporciona simultáneamente en una misma área (Figura 1.1), y tiene como objetivos:

- Proteger y recuperar a los ecosistemas y a la biodiversidad.
- Recuperar las funciones ecológicas de los ecosistemas y, por tanto, conservar los servicios que proveen.
- Brindar algunos otros servicios ambientales dependientes de los servicios ecosistémicos.
- Procurar una mejor calidad de vida y bienestar humano.
- Promover el desarrollo de la economía verde y de la gestión sostenible del territorio.

Conocer la interrelación entre la infraestructura verde, la conectividad, la biodiversidad, las funciones y los servicios ecosistémicos es fundamental para la toma de decisiones en ámbitos relacionados con la planificación de usos del territorio. En este sentido, el pensamiento integral para la planificación de la infraestructura verde es obligado, ya que se dirige a entender los procesos sinérgicos que se llevan a cabo en el espacio y a partir de los cuales se generan los servicios ecosistémicos de los que depende el bienestar social y el ecológico.

Identificar los servicios ecosistémicos afectados o que pueden ser afectados por el desarrollo, ayuda a visualizar acciones encaminadas a protegerlos o a mitigarlos (Gil-Hernández *et al.*, 2017); de aquí también la relevancia de un trabajo transdisciplinario.

A grandes rasgos, dentro de los servicios ecosistémicos de regulación¹ se tienen buenos indicadores de la resiliencia del ecosistema, aunque no se deben perder de vista los servicios de provisión² y los culturales.³ Asimismo, desde esta perspectiva socio-ecológica de los ecosistemas, es necesario identificar a los beneficiarios de los servicios ecosistémicos, conocer quiénes acceden a qué servicios y quiénes son excluidos. Considerar el aspecto social de los ecosistemas implica reconocer la existencia de relaciones de poder entre los agentes sociales de interés y la diversa importancia que éstos atribuyen a los servicios ecosistémicos.

Reconocer todos estos aspectos es fundamental y útil para justificar la estrategia de infraestructura verde, y de la restauración y la conectividad ecológica, ya que su desarrollo contribuirá a la provisión de diversos servicios ecosistémicos y a la conversión del territorio y de la sociedad hacia una mayor resiliencia frente a situaciones ambientales y socioeconómicas adversas.

En la Figura 1.1 se muestra un esquema de la influencia de la infraestructura verde en la multifuncionalidad del bienestar.

Figura 1.1
Concepción multifuncional de la infraestructura verde.



Fuente: Tomado de <http://femp.femp.es/files/3580-2187-fichero/Maria%20Pita%20-%20MITECO.pdf>

En principio, la infraestructura verde debe ser multifuncional y favorecer la conectividad de las poblaciones de fauna y flora para garantizar su conservación a largo plazo. Al mismo tiempo debe ser capaz de recuperar y fortalecer las funciones de los ecosistemas que son las responsables del suministro de los servicios ecosistémicos.

La infraestructura verde se asemeja a una estructura fractal, con elementos que van desde la escala continental, como grandes corredores transnacionales que contribuyen a garantizar la conservación de las especies al favorecer los flujos genéticos a largo plazo, hasta elementos de reducidas dimensiones que tienen un gran valor para la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos a escala local como los pasos para fauna silvestre en carreteras. Al desempeñar varias funciones a varias escalas, considerando e integrando las múltiples conexiones e interacciones esenciales en el ambiente, la infraestructura verde se constituye como una herramienta de gestión muy eficaz que ofrece grandes beneficios.

En resumen, pueden considerarse los siguientes elementos como aquellos que definen o caracterizan a la infraestructura verde (Quiroz-Benítez, 2018):

- a) **Red:** vinculación o conexión espacial que permite el movimiento de personas, fauna, viento y agua, por ejemplo, mediante la creación de corredores ecológi-

¹ Se incluyen como servicios ecosistémicos de regulación, aquellos procesos ecosistémicos complejos mediante los cuales se regulan las condiciones del ambiente en que los seres humanos realizan sus actividades productivas. En esta categoría se incluyen la regulación climática, hídrica, la regulación de los vectores de enfermedades, la regulación de la erosión de los suelos, la regulación del clima y el agua, etcétera.

² Se trata de bienes tangibles, en esta categoría están incluidos los alimentos, el agua, la madera, las fibras, entre otros. Estos servicios proporcionan el sustento básico de la vida humana; los esfuerzos por asegurar su provisión guían las actividades productivas y económicas.

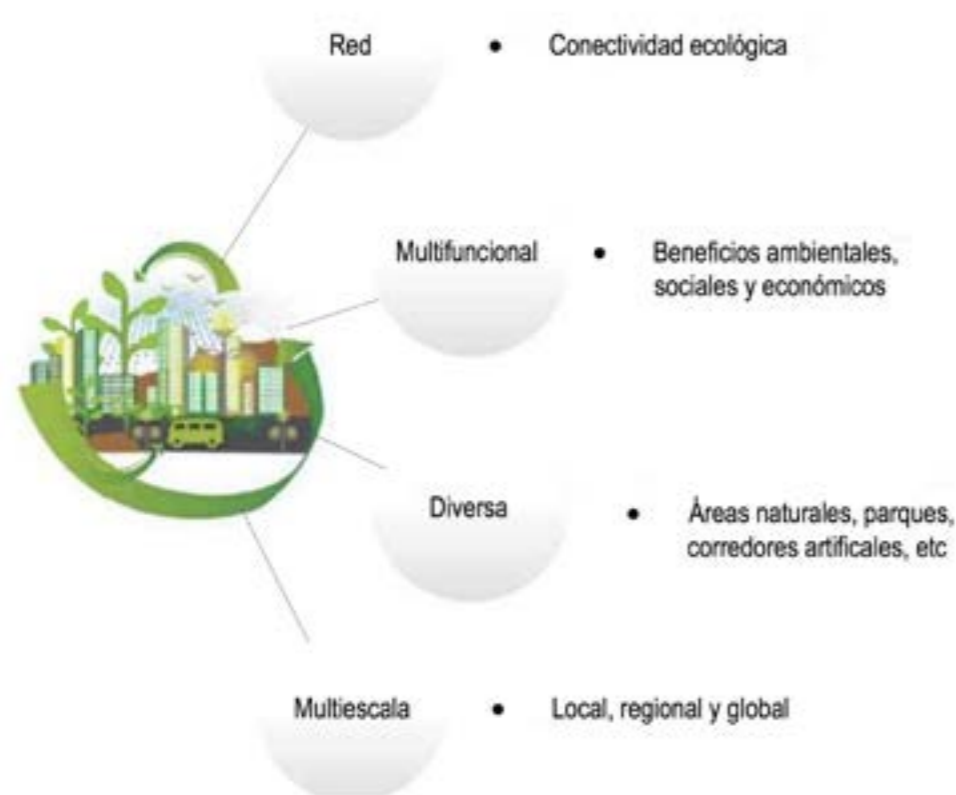
³ Beneficios que dependen de las percepciones colectivas de los humanos acerca de los ecosistemas y de sus componentes, los cuales pueden ser materiales o no materiales, tangibles o intangibles. Los beneficios espirituales, recreativos o educacionales que brindan los ecosistemas se consideran en esta categoría.

cos, peatonales o ciclistas, así como calles completas que incluyan áreas verdes, no sólo como un factor del paisaje sino como proveedoras de servicios ecosistémicos y ambientales.

- b) **Multifuncional:** además de proporcionar espacios de recreación, permite la integración de funciones estructurales, mediante la provisión de servicios ecosistémicos que pueden contribuir a mitigar y/o adaptarse al Cambio Climático, brindando simultáneamente diversos beneficios ambientales, sociales y económicos.
- c) **Diversa:** los espacios que la conforman pueden ser naturales como ríos, humedales y bosques y espacios antrópicos como zanjas, camellones, muros verdes, Infraestructura Verde Vial, entre otros.
- d) **Multiescalar:** considerar la escala de intervención es primordial para la implementación de la infraestructura verde. Por ejemplo, el proyecto de infraestructura vial puede estar planteado para beneficiar a una escala local, pero el campo de intervención debe ser analizado desde un enfoque regional. Para ser funcional, la Infraestructura Verde Vial debe ser concebida como una red, siendo indispensable que se vincule con un enfoque sistémico.

Figura 1.2

Elementos que definen o caracterizan a la infraestructura verde.



Fuente: Tomado de Quiroz-Benítez, 2018.

1.1 Infraestructura Verde Vial

El desarrollo de infraestructura vial es considerado como uno de los pilares de crecimiento económico más importantes de la sociedad porque permite comunicar regiones de un territorio y realizar actividades de gran valor como el intercambio comercial y cultural. Tanto en México como en el mundo ésta ha sido una herramienta crucial de crecimiento económico y bienestar social al potenciar el desarrollo y la integración regional, favorecer la entrega oportuna de bienes y servicios, así como la reducción de costos en términos de desplazamiento y comunicación. No obstante, su construcción también ha sido fuente de destrucción de servicios ecosistémicos y fragmentación de hábitats para muchas comunidades de flora y fauna. La infraestructura vial requiere de la extracción de grandes cantidades de recursos naturales, modificación del uso del suelo, cambios drásticos en el paisaje y hábitats, efectos y presiones sobre el patrimonio cultural, incluyendo sitios de interés arqueológico, caminos históricos o tradicionales. Además, su levantamiento origina concentraciones significativas de gases efecto invernadero, facilitando vertimientos tanto industriales como domésticos. En algunos casos se propicia el deterioro de la calidad de vida de las comunidades cercanas al proyecto de infraestructura vial (Gobierno de Colombia, 2020).

Al igual que con muchos temas en el ámbito de lo natural y lo social, este tema exige una mirada socio-ecológica que considere la realidad de los conflictos abiertos en este ámbito como parte de un mismo proceso de formación y transformación, no como anomalías o desviaciones independientes que deberían desvincularse.

Por lo tanto, es necesaria una infraestructura vial capaz de ofrecer una respuesta integral a los requerimientos funcionales de comunicación y movilidad, sin comprometer el ordenamiento ambiental territorial, ni amenazar la conservación de la biodiversidad ni los servicios ecosistémicos. Concebir una Infraestructura Verde Vial implica el desarrollo de un proyecto sustentable, pero también un cambio en la concepción de las prioridades y los criterios para definir rutas y especificaciones, así como una participación interinstitucional, multi y transdisciplinaria dentro de una política de planeación en los niveles de gobierno que competa.

Diferentes organizaciones internacionales han desarrollado importantes investigaciones que han llevado a definir los conceptos y criterios para considerar a una infraestructura vial como una Infraestructura Verde Vial; algunos de los más importantes son expuestos a continuación (Ordoñez-Díaz y Meneses-Silva, 2015).

- La Federación Europea de Carreteras (ERF) define las carreteras sostenibles como las vías que son eficaces y eficientemente planeadas, diseñadas, construidas, modernizadas y conservadas mediante políticas integradas con respeto al ambiente, y que conservan el beneficio socioeconómico esperado en términos de movilidad y seguridad.
- La Administración Federal de Carreteras (FHWA) en Estados Unidos, define una carretera sostenible como la que satisface los requisitos funcionales del ciclo de vida del desarrollo social y el crecimiento económico mientras que contribuye a mejorar el entorno natural y reducir el consumo de recursos naturales desde su concepción hasta la construcción, operación y mantenimiento.
- El Sistema de Carreteras Verdes (*greenroads*) define un proyecto de Infraestructura Verde Vial como aquel que ha sido diseñado y construido a un nivel de

sustentabilidad, que es sustancialmente más alto que la práctica común actual, que contiene los elementos clave de la ecología, la equidad y la economía, favoreciendo el aprovechamiento medido de los recursos naturales renovables y no renovables a lo largo de la vida útil, el bienestar de la sociedad y la rentabilidad económica.

Para implementar el desarrollo de la Infraestructura Verde Vial, los lineamientos de ésta deben de estar encaminados a incluir desde las etapas más tempranas de su planificación, consideraciones ambientales y de desarrollo sustentable que permitan garantizar el bienestar social y ecosistémico (WWF, 2021).

De acuerdo con el marco conceptual realizado de manera conjunta entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Transporte de Colombia, la Infraestructura Verde Vial tiene los siguientes atributos:

- Es el resultado de la coordinación entre las entidades responsables de la planeación, el diseño y la ejecución de los proyectos de infraestructura vial, las autoridades ambientales, las entidades nacionales y territoriales y las comunidades a las que se busca beneficiar con dicha infraestructura.
- Identifica en etapas tempranas de su estructuración como proyecto, los principales impactos potenciales, ya sean directos o indirectos, sinérgicos y/o acumulativos, con el fin de considerarlos en los análisis de costo/beneficio, contribuyendo de esta forma a que la decisión de viabilidad tenga incorporados los costos ambientales.
- Se integra funcional y estructuralmente a la red de transporte de manera intermodal y ambientalmente sostenible.
- Incorpora medidas de manejo tendientes a evitar los conflictos sociales y ambientales asociados a la infraestructura vial y/o contribuye a su gestión, generando el empoderamiento del componente ambiental del proyecto por parte de las comunidades.
- Incorpora consideraciones ambientales para garantizar el respeto al ordenamiento ambiental territorial y las determinantes ambientales, así como a los usos de suelo permitidos en Áreas de Especial Interés Ambiental, en caso de que las áreas de influencia de la infraestructura vial se superpongan con este tipo de áreas.
- Obedece a una estricta aplicación de la jerarquía de mitigación de impactos.
- Favorece la conectividad ecológica y del paisaje.
- Contribuye a la conservación y/o restauración de la estructura, la función y la dinámica de los ecosistemas terrestres y acuáticos.
- En caso de que persistan impactos ambientales que no fueran posibles de evitar, prevenir, mitigar o corregir, se promueven y aplican medidas de compensación de impactos ambientales, agregadas y complementarias a las propuestas por otros proyectos, o bien, con respecto a iniciativas de fortalecimiento del ordenamiento ambiental territorial con el fin de lograr efectos a escala local y regional.

- Incorporar criterios y medidas tendientes a que la infraestructura vial contribuya a la mitigación del Cambio Climático y a la gestión del riesgo, en todas las fases del proyecto de la infraestructura vial.

La planeación de la Infraestructura Verde Vial se ha enmarcado principalmente en programas de manejo a lo largo de todas sus etapas de desarrollo, desde la misma planeación estratégica sectorial, hasta su diseño, construcción, conservación y operación, e integra consideraciones ambientales, sociales, económicas y tecnológicas, con el propósito de evitar, prevenir, mitigar y corregir los potenciales impactos ambientales negativos que genera este tipo de proyectos, sean estos directos o indirectos, sinérgicos y acumulativos, generando un balance ambiental neto positivo (Gobierno de Colombia, 2020).

En la siguiente Figura se muestran los beneficios particulares de la Infraestructura Verde Vial.

Figura 1.3
Características de la Infraestructura Verde Vial según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Transporte de Colombia.



1.2 Servicios ecosistémicos impactados por la infraestructura vial y su potencial para la aplicación de técnicas de Infraestructura Verde Vial

Se entiende por servicios ecosistémicos al conjunto de los beneficios que los ecosistemas aportan al bienestar humano y que se obtienen a partir de procesos y funciones ecológicas, así como también las percepciones y acciones colectivas de los humanos acerca de los ecosistemas y sus acciones sobre éstos (Balvanera *et al.*, 2009; MA, 2003). En este sentido, la infraestructura vial al existir dentro de un ecosistema se beneficia o afecta según la conservación o destrucción de los servicios ecosistémicos asociados a la cobertura vegetal, el sistema hídrico, el suelo, la biodiversidad o el clima. De manera que, dependiendo del nivel de afectación o del cambio de uso de suelo que ejerza la construcción de la infraestructura vial sobre estos elementos naturales, se verá afectada la estabilidad ecosistémica así como el funcionamiento de los procesos que brindan otros beneficios o servicios, tales como la retención del suelo, el control de la escorrentía, la regulación del clima, entre otros, que no solo benefician la permanencia de la vida, también protegen la infraestructura vial construida.

El agua, la productividad primaria,⁴ el suelo, el clima y la biodiversidad son considerados servicios ecosistémicos de soporte ya que son procesos ecológicos básicos que aseguran el funcionamiento adecuado de los ecosistemas y el flujo de servicios de provisión, de regulación y culturales. Los servicios ecosistémicos de soporte son indirectos, intrínsecos e incluso se pueden llegar a producir en periodos de tiempo muy largos. Por ejemplo, los seres humanos no utilizan directamente los servicios de formación de suelo (tiempos geológicos), aunque los cambios en éste afectan indirectamente a las personas a través del impacto en el servicio de provisión durante la producción de alimentos.

Con la implementación de la Infraestructura Verde Vial se deben fortalecer los servicios ecosistémicos de soporte para generar un efecto en cascada que origine la multifuncionalidad e impulse la creación de sistemas de desarrollo sustentable⁵ y sostenible⁶ que contribuyan incluso con los compromisos de México con la Agenda 2030. Para ello, es importante identificar y entender el comportamiento de los servicios ecosistémicos de soporte en los ecosistemas e implementar acciones que favorezcan a la política ambiental y contribuyan con la protección de la infraestructura vial.

A continuación, se brinda una explicación de los servicios ecosistémicos mayormente afectados por la infraestructura vial y su relevancia en términos ecológicos.

⁴ Conversión de energía lumínica en tejido vegetal.

⁵ Entendiéndose como el desarrollo que busca incorporar en el análisis un enfoque ambiental, social, político y económico de común entendimiento entre las partes. Es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

⁶ En ecología y economía es lo que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar daño grave al ambiente.

1.2.1 La conectividad ecológica de los ecosistemas y la infraestructura vial

Para entender la relevancia de la conectividad ecológica primero es preciso comprender qué es un ecosistema y cómo influye en la formación de la vida. Desde una perspectiva de sistemas, un ecosistema es el resultado de entidades vivas y no vivas que interactúan en el tiempo y el espacio a diferentes escalas jerárquicas. Los ecosistemas son tan pequeños como una gota de agua (o incluso más pequeños, como un grupo de bacterias que interactúan en la esquina de una pared celular) o tan grandes como todo el planeta. Desde la misma perspectiva de sistemas, un socio-ecosistema es el resultado de la interacción de los seres humanos y los ecosistemas en el tiempo y el espacio a diferentes escalas jerárquicas (Maas y Equihua, 2015).

Los ecosistemas y los socio-ecosistemas se pueden describir como sistemas complejos y dinámicos de comunidades de plantas, animales, microorganismos y el ambiente inorgánico con el que interactúan como una unidad funcional (MA, 2003). Al estar estructurados jerárquicamente se requiere entender las dinámicas que ocurren en su interior, siendo fundamental una visión integral de los procesos que generan. Este hecho es la razón por la cual los procesos funcionales en ellos operan a diferentes escalas (espaciales y temporales) y por lo cual toda acción que se realice en su interior puede repercutir en ecosistemas adyacentes (MA, 2003; Maass, 2003).

El concepto de ecosistema y a la par los socio-ecosistemas ofrecen un marco valioso para analizar e intervenir en los vínculos que existen entre sociedad y ambiente, ya que en ellos se encuentra la clave del entendimiento del sistema de soporte de la vida del planeta, es así como su equilibrado funcionamiento repercute en los diversos servicios que otorga para su subsistencia.

Los cambios en los ecosistemas modifican la capacidad que tienen los mismos para brindar servicios e incluso algunos que no son tan perceptibles. Esto se debe a que existe una amplia dependencia e interacción entre los organismos y su medio natural (Sarukhán *et al.*, 2009). La fragmentación generada a partir de fenómenos antrópicos, como es la construcción de la infraestructura vial, ocasiona fuertes impactos ambientales, dentro de los cuales destacan:

- I. Pérdida de superficie del ecosistema.
- II. Aparición de barreras no naturales en las áreas de distribución de las poblaciones de las especies y con ello el incremento en su mortalidad debido a :
 - Aislamiento reproductivo.
 - Separación de poblaciones, con lo cual se origina la presencia de meta poblaciones, mismas que tienen mayor probabilidad de extinción en comparación con poblaciones de mayor tamaño.
 - La fauna puede verse limitada en su posibilidad para obtener fuentes de alimentación.
 - Posibilidad de generación del efecto barrera entre polinizadores y su objetivo a polinizar.
- III. Mortalidad por atropellamiento de la fauna.
- IV. Generación de efecto de borde, mismo que origina condiciones con mayor temperatura, menor humedad, mayor radiación y susceptibilidad de viento (modificación del microclima), favoreciendo así la aparición de especies invasoras que

desplazan a las especies locales y, por lo tanto, contribuyen con la destrucción del ecosistema original y su función.

- V. Efectos en cascada. Considerando a la cuenca como una unidad ecosistémica y jerárquica bajo la teoría de sistemas, es factible entender cómo los efectos de la fragmentación ecosistémica, aun cuando sean aplicados a nivel local, puede generar efectos en cascada. Por lo tanto, toda acción que se realice dentro de ellas puede repercutir en ecosistemas adyacentes (MA, 2003; Maass, 2003), de ahí la relevancia de los estudios multiescala.

En términos de la fragmentación, la conservación de la conectividad ecológica es la respuesta clave a la destrucción y fragmentación de hábitats naturales por parte de humanos en ambientes terrestres, de agua dulce y marinos. También es una respuesta crítica a las amenazas causadas por el Cambio Climático. Esta respuesta beneficia a las especies nativas, la conservación de la biodiversidad, los ecosistemas y los procesos ecológicos y evolutivos y, lo que es más importante, es positivo para el bienestar del ser humano (Worboys *et al.*, 2016).

Una de las estrategias para gestionar y mantener la conectividad ecológica es el mantenimiento o la construcción de corredores ecológicos. El Grupo de Especialistas en Conservación de la Conectividad WCPA de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2014) define un corredor ecológico como *un espacio geográfico claramente definido, reconocido o no como un área protegida u otra medida de conservación efectiva basada en el área, que se gobierna y administra a largo plazo para conservar o restaurar la efectiva conectividad ecológica, con servicios ecosistémicos asociados y valores culturales y espirituales*. Esto significa que un corredor ecológico es un hábitat que existe naturalmente en el paisaje y necesita ser mantenido, mejorado o restaurado para que las especies puedan usarlo para satisfacer sus necesidades esenciales.

Desde la perspectiva de la Infraestructura Verde Vial, un corredor ecológico también puede incluir enlaces artificiales, como pasos inferiores y superiores de vida silvestre conocidos como “pasos para fauna”. Estas estructuras forman parte de las medidas aplicadas hoy en día en la infraestructura vial para proteger a los usuarios y a la fauna de accidentes, ya sea para evitar atropellamientos de la fauna o por la colisión con la misma; además de mantener la conectividad entre ecosistemas posteriormente a la construcción de la infraestructura vial.

En la infraestructura vial, la conectividad ecológica se trabaja desde la planeación de una red de infraestructura vial ecológicamente sostenible, mediante un enfoque holístico⁷ que integra factores sociales y ecológicos. La prevención de los impactos ecológicos en este sentido resulta ser el objetivo crucial de los análisis de conectividad ecosistémica, ello evita o minimiza en la medida de lo posible, desde la etapa de planeación, cualquier afectación ecológica. Este análisis ayuda a identificar desde etapas tempranas aquellos sitios que pueden ser relevantes para la implementación de obras encaminadas a una Infraestructura Verde Vial, con la intención de generar corredores ecológicos que faciliten la permeabilidad entre el ambiente natural y la infraestructura vial.

⁷ La tendencia de la naturaleza a usar una evolución creativa para formar un todo que es mayor que la suma de sus partes.

1.2.2 El papel de la cobertura vegetal en los ecosistemas y en la infraestructura vial

La cubierta vegetal es entendida aquí como la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre y para términos de este trabajo, con exclusión de tierras utilizadas para prácticas agrícolas, forma parte de los servicios ecosistémicos de soporte (MA, 2005a). Esta mención otorga a la vegetación en general un gran peso en lo relativo al mantenimiento de la vida en la Tierra, pues de ella dependen una gran cantidad de servicios ecosistémicos sin los cuales la vida no podría existir como la conocemos. Estos servicios incluyen la conservación del suelo, al proteger los paisajes contra la erosión y los deslizamientos de tierra, particularmente en las montañas; la conservación del agua, al retener y mantener su calidad protegiendo las orillas de los ríos contra la destrucción (abrasión), previniendo la sedimentación de depósitos y la redistribución de la escorrentía superficial y subterránea (Biao *et al.*, 2010); la regulación del clima y en mayor escala la mitigación del Cambio Climático global, con el aumento de las precipitaciones y la disminución de la evaporación así como el importante rol que juega en la regulación del ciclo global del carbono; la conservación de la biodiversidad, al operar como importantes refugios para biodiversidad terrestre y proveer de alimentos y diversos productos de los cuales también el humano se beneficia; en el contexto social mejora las condiciones urbanas y periurbanas al proveer recursos para el desarrollo de la economía. Además, mantiene el patrimonio cultural donde muchas comunidades indígenas desarrollan sus tradiciones y espiritualidad, genera oportunidades de empleo y propicia las actividades recreativas, por mencionar algunas (Chan *et al.*, 2006; Chazdon, 2008; Heller y Zavaleta, 2009; MA, 2005a; Trinidad-Lora, 2021).

Durante el proceso de construcción de la infraestructura vial se requiere efectuar el desmonte de la zona, lo que implica remover totalmente la cobertura vegetal. Esta acción, al igual que el despalme, posiblemente sean las acciones de mayor impacto ambiental y no son mitigables, por lo que siempre es preferible evitar el impacto negativo en estas áreas desde la etapa de la planeación y conservar en la medida de lo posible la conectividad ecológica.

El desmonte genera fragmentación, de manera tal que las afectaciones por la pérdida de la cobertura vegetal no sólo se remontan a la vegetación perdida por esta actividad, sino que, además, al ser ésta parte de un sistema, las redes de interacción ocasionan que los efectos negativos de dicha pérdida se extiendan a un área mucho mayor, dependiendo del contexto ecológico del lugar éstas pueden ser mayor o menormente graves. En este sentido, la vegetación en la Infraestructura Verde Vial pretende generar acciones que minimicen los impactos negativos y ofreciendo alternativas para brindar una multifuncionalidad de servicios en complemento de la Infraestructura Verde Vial. Esto es posible dado que la cobertura vegetal es un servicio ecosistémico de soporte y, por lo tanto, su consideración e incorporación desde el diseño de la infraestructura vial, puede ofertar más de un servicio ecosistémico, minimizando así los impactos generados por su construcción.

Para que el ámbito de la preservación vegetal en un proyecto de infraestructura vial resulte exitoso es importante pensar en el tipo de servicio que se desea implementar, no basta con sembrar plantas sin considerar un objetivo estratégico para su implementación. El objetivo que se proponga para el uso de la vegetación es la base que guía el diseño y el éxito de la implementación de la Infraestructura Verde Vial. Como

ejemplo, muchos proyectos de revegetación del derecho de vía, compartirán el objetivo común de iniciar y acelerar los procesos de sucesión natural, para establecer comunidades de plantas nativas que puedan sostenerse por sí mismas (Brown y Amecher, 1999; Clewell *et al.*, 2005). También pueden comenzar por incrementar el hábitat de polinizadores, proteger los recursos de suelo y agua, favorecer el secuestro de carbono, mejorar la estética del derecho de vía, limitar las plantas invasivas, y/o mejorar la seguridad vial y el funcionamiento del camino (por ejemplo, controlando la erosión del suelo y las inundaciones que pueden perjudicar la infraestructura vial, así como mediante la estabilización de taludes y cortes) mientras se protege al ambiente. Esta es la diferencia entre un proyecto ajardinado y la implementación de un proyecto de Infraestructura Verde Vial.

El uso e implementación de plantas nativas en proyectos de Infraestructura Verde Vial serán siempre la mejor opción y la base para mantener las funciones ecológicas del sitio, son claves para integrar la infraestructura vial al medio natural, influyendo así en la conservación del suelo, la vida silvestre, el hábitat de polinizadores, las comunidades de plantas, el control de las especies invasivas y la calidad del agua.

Los obstáculos más comunes para establecer comunidades de plantas nativas en el derecho de vía suelen ser técnicos, informativos y de organización. Un proyecto exitoso puede lograrse a pesar de los recursos limitados, cuando se consideran estrategias y técnicas prácticas para revegetar zonas perturbadas. Los proyectos exitosos y eficientes pueden incrementarse cuando múltiples disciplinas son capaces de comunicarse y coordinarse como un equipo en la etapa inicial de la planeación del proyecto de infraestructura vial (FHA, 2007; FHA, 2019).

Por otro lado, así como los impactos negativos se extienden más allá de la zona directa de afectación, también las acciones de revegetación (con propósitos bien establecidos en términos de Infraestructura Verde Vial y en consideración de los objetivos planteados) tendrá efectos positivos y brindarán servicios más allá de la infraestructura vial.

1.2.3 El papel del suelo en los ecosistemas y en la infraestructura vial

El concepto de suelo es algo complejo ya que tiene diferentes acepciones, dependiendo del enfoque desde el cual se aborde. Normalmente “el suelo” se define a partir de sus aplicaciones o uso.

En general se puede decir que el suelo es un cuerpo natural que tiene variaciones en sus propiedades, resultado de las condiciones biofísicas locales (roca-clima-vegetación), la historia geomorfológica y el uso de la tierra (Cotler *et al.*, 2007). Es un sistema abierto en el que se llevan a cabo procesos de intercambio de masa y energía entre los compartimentos que lo definen (roca-vegetación-aire-agua). Es un sistema dinámico, ya que dentro de éste se llevan a cabo una serie de procesos a partir de reacciones de transformación que resultan en productos orgánicos y minerales. La evolución del suelo es constante y su composición es el resultado de la interacción en diferentes lapsos de tiempos, desde cientos a miles de años.

Debido a que el suelo es un compartimento que resulta de la interacción de todos los sistemas naturales, es un elemento que se involucra en el manejo de la flora y fauna, en el manejo de la calidad del agua, en la calidad del aire, en las condiciones atmosféricas y en la salud humana. La función más conocida es la de sustento y suministro de nutrientes para las plantas. De ahí que la degradación del suelo sea considerada como

el mayor problema ambiental que amenaza la producción mundial de alimentos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2010) y una de las principales amenazas para el desarrollo sostenible de los terrenos agrícolas (Castillo, 2004).

Desde el punto de vista de sus servicios, el suelo es uno de los componentes más importantes del ambiente, representando uno de los hábitats más ricos en especies de los ecosistemas terrestres. Sus funciones incluyen toda la gama de servicios ecosistémicos clasificados por la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MA, 2005) y de los cuales dependen las poblaciones humanas. El suelo se encuentra catalogado dentro de los servicios ecosistémicos de soporte por ser un elemento que influye en la permanencia de muchos otros servicios ecosistémicos. Dentro de los servicios que este elemento ofrece se encuentran los siguientes: la moderación del ciclo hidrológico, el soporte físico para las plantas, la retención y oferta de nutrientes para las plantas, el procesamiento de desechos y de materia orgánica muerta, el mantenimiento de la fertilidad del suelo, hábitat para muchos organismos que realizan algunas de estas funciones, almacén de carbono más importante en la Tierra, aporte de servicios culturales como la estética, educación y espiritualidad. Su formación es muy lenta y la economía, el bienestar humano y ambiental en general, dependen de los bienes y servicios proporcionados por este componente (Balvanera *et al.*, 2009; Blum, 2005; Jónsson y Davíðsdóttir, 2016; Trinidad-Lora, 2021).

A pesar de su importancia ambiental, social, económica y cultural, el suelo es un recurso bajo presión por diferentes actividades derivadas de la modernización de las sociedades, entre ellas la construcción de la infraestructura vial, que conlleva a diferentes cambios en el suelo como el despalme (que implica remover las primeras capas de suelo y con ello la pérdida total del mismo); la compactación y pavimentación del suelo en el área de construcción de la vía que evita principalmente la infiltración y su capacidad de dar soporte a las plantas; retiro de vegetación (desmonte) éste queda expuesto a factores como la lluvia y el viento que aceleran pérdida por erosión; el movimiento de tierra por erosión es causante de contaminación atmosférica y de azolve de cuerpos de agua; con la compactación del suelo para la construcción de caminos y/o campamentos durante la etapa de construcción y operación de la infraestructura vial, éste pierde sus propiedades físicas y su funcionalidad.

Debido a la crucial importancia del suelo para el óptimo funcionamiento de diversos mecanismos dentro de un ecosistema, su conservación y restauración conforman elementos clave dentro de las prácticas sustentables. Particularmente, destaca la importancia de su manejo, rehabilitación y mantenimiento en la construcción de la infraestructura vial donde se ejercen grandes presiones e impactos negativos sobre este sistema natural.

Un ejemplo de recuperación del suelo se basa en la formación de tecnosuelos, los cuales se conforman a partir de residuos sólidos urbanos, industriales, excavación, construcción y/o de minas (Morel *et al.*, 2015; Seré *et al.*, 2008; Setälä *et al.*, 2013) que corresponden a material orgánico como la composta, residuos de jardinería y lodos residuales e inorgánicos, como los que vienen de excavaciones, construcciones, residuos mineros etcétera.

La conformación de tecnosuelos representa una oportunidad para reciclar material y conformar suelo según diferentes necesidades (Minixhofer y Stangl, 2021), utilizando

materiales locales con la idea de reducir costos, uso de materiales ajenos y restaurar diferentes funciones del suelo, ya sea para aumentar la conectividad o para mejorar su resiliencia.

El manejo de tecnosuelos en la construcción de la infraestructura vial está poco documentado, pero presenta una oportunidad para implementarse en diferentes técnicas de construcción de Infraestructura Verde Vial. En la actualidad, en México existen pocos grupos que abordan el estudio de los tecnosuelos (González y Chávez, 2020; Prado *et al.*, 2020) y sus resultados prometen una aplicación de esta tecnología a la construcción de la Infraestructura Verde Vial, en los siguientes capítulos se aborda con mayor profundidad la aplicación de esta técnica en la Infraestructura Verde Vial.

En general, el suelo es un recurso no renovable ya que su tasa de generación se encuentra por debajo del ritmo al que se destruye. Por ese motivo surge la necesidad de crear estrategias que ayuden a compensar los impactos generados al sistema. Esto puede lograrse fortaleciendo las técnicas que permitan incrementar la tasa de infiltración, sostener la cobertura vegetal y disminuir procesos erosivos.

Por sus características físicas y químicas, cada tipo de suelo es una fuente importante de funcionalidad ecosistémica y es representativo de la diversidad ecológica. Es decir, cada tipo de suelo cumple una función única de acuerdo con sus características y a su posición en el espacio, si éste se pierde también se pierden funciones ecológicas (Arias, 2018). El objetivo de la implementación de componentes de la Infraestructura Verde Vial que permitan conservar los suelos, será establecer metas claras para su manejo, ayudando así a restablecer su funcionalidad, considerando el tipo de servicios ecosistémicos que se requiera ofertar.

México utiliza uno de los dos sistemas de clasificación más armonizados en el mundo, se trata de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Working Group WRB, 2015) (World Reference Base for Soil Resources, conocida como WRB por sus siglas en inglés), adoptada por el INEGI para construir los mapas de unidades del suelo.

La versión de la WRB, 2014 incluye como suelo a los suelos urbanos pavimentados, áreas urbanas, de cuevas y subacuáticos. INEGI reporta 25 de las 32 unidades descritas a nivel mundial (SEMARNAT, 2015). Sin embargo, seis unidades de suelos son las más representativas y cubren el 80.7% del territorio nacional (Leptosol, Regosol, Feozem, Calcisol, Luvisoles y Vertisoles). La información de la siguiente Tabla permite entender el riesgo de pérdida de suelo por erosión o degradación que representan criterios para la planeación de infraestructura vial a diferentes escalas de los proyectos.

Tabla 1.1
Unidades de suelo más importantes en el territorio mexicano y su vulnerabilidad a la degradación.

Unidad de suelo	Característica	Vulnerabilidad
Leptosol	Muy delgados (espesor < 25 cm), sobre una roca dura.	Poco desarrollo, pedregosos. Vulnerables a la erosión hídrica.
Regosol	Sobre materiales originales sueltos (o con roca dura a + de 25 cm). Muy baja evolución.	Poco profundos, poco desarrollo. Susceptibles a la erosión.
Feozem	Suelos oscuros, ricos en materia orgánica, porosos.	Susceptibles a la erosión hídrica y eólica.
Calcisol	Suelos con acumulaciones de carbonatos.	Elevada concentración de calcio y formación de costras.
Luvisol	Suelos muy desarrollados, arcillas > 30%, profundos.	Sin vegetación pueden llegar a erosionarse con la lluvia.
Vertisol	Alto contenido en arcillas (>3%). Los cambios de humedad provocan movimientos internos y cambio de volumen.	Suelos con potencial de manejo agrícola.
Cambisol	Suelo con un horizonte cámbico, es decir de neoformación de Arcillas (formación de un horizonte B).	Sin vegetación pueden llegar a erosionarse con la lluvia.
Solonchak	Suelos con un alto contenido en sales solubles.	Vulnerables a la erosión eólica.
Arenosol	Muy arenosos (como mínimo textura arenosa franca). Muy baja evolución.	Vulnerables a la erosión eólica.
Kastañozem	Alto contenido de materia.	Muy vulnerables a la erosión hídrica.
Chernozem	Muy alto contenido de materia orgánica, con carbonatos secundarios en el horizonte inferior.	Muy vulnerables a la erosión hídrica.
Gleysol	Suelos con hidromorfía (por manto freático) permanente (o casi) en los primeros 50 cm.	Baja vulnerabilidad a ser erosionados, pero son suelos inundados.
Fluvisol	Formado a partir de materiales flúvicos recientes (o en ríos represados si todavía el material original no ha evolucionado). Se encuentra cerca de los ríos.	Muy vulnerables a la erosión hídrica.
Andosol	Suelos desarrollados casi siempre a partir de materiales volcánicos piroclásticos.	Muy vulnerables a la erosión hídrica y eólica.

Fuente: Tomado de SEMARNAT, 2015.

Si bien, los suelos artificiales son reconocidos por la WRB, éstos no representan una unidad importante a nivel nacional, ya que se encuentran en áreas modificadas por el hombre, como zonas urbanas, áreas mineras, militares y carreteras. Los suelos artificiales (tecnosuelos) representan una oportunidad de construir suelos con diferentes capacidades que apoyen la conservación y manejo de zonas urbanas o infraestructuras viales, por ejemplo, si es necesario construir infraestructura que permita mantener servicios ecosistémicos.

En general, algunos de los puntos que deben ser considerados en la infraestructura vial, en lo referente al cuidado y a la protección del suelo, son los siguientes:

- Recuperación del horizonte orgánico de las áreas removidas.
- Recuperación de la biomasa de árboles talados y arbustos para composteo.
- Identificación de zonas de alto riesgo de derrumbes en pendientes pronunciadas.
- Identificación de suelos muy orgánicos para manejo especial a través de un plan de manejo especial.
- Identificación de tipo de suelo y evaluación del riesgo de erosión.
- Identificación de material de desmonte para el manejo de residuos a través de composteo.
- Control de erosión en brechas y caminos.
- Identificación de bancos de tiro y préstamo, y su manejo y aprovechamiento.
- Construcción de obras de drenaje mayor y menor, túneles y puentes en zonas críticas, para determinar características y estrategias del manejo de suelo de acuerdo con los objetivos.
- Control de erosión laminar, o infraestructuras para mejorar la conectividad entre ecosistemas.

Dada la relevancia que tiene el suelo como servicio ecosistémico de soporte, es necesario promover la conciencia sobre el papel que desempeñan en el ecosistema, y por lo tanto emprender prácticas y fomentar criterios para su mejor conservación.

1.2.4 El papel de la hidrología en los ecosistemas y en la infraestructura vial

De los recursos hídricos, es decir del agua, depende un gran número de servicios ecosistémicos, por lo que su simple presencia denota un Servicio Ecosistémico de soporte. Sin embargo, al igual que el ecosistema y su estado de conservación, el ciclo del agua desempeña tantas funciones en el ambiente, que es difícil encasillarla o definirla únicamente como un servicio de soporte, regulación o provisión (Balvanera *et al.*, 2009; Falkenmark, 1997). En este sentido, los sistemas acuáticos son muy importantes porque incluyen una rica variedad de ecosistemas que sustentan una enorme diversidad de especies nativas de flora y fauna, muchas de ellas endémicas y de gran relevancia en el ciclo hidrológico de diferentes regiones del país (Sarukhán *et al.*, 2009). Conjuntamente, los servicios que proveen son múltiples incluyendo el control de inundaciones, almacenamiento de agua, control de plagas, retención del suelo, control y estabilización de microclimas, provisión de alimentos, purificación de desechos, provisión de servicios estéticos y recreativos, entre otros (Comisión Nacional

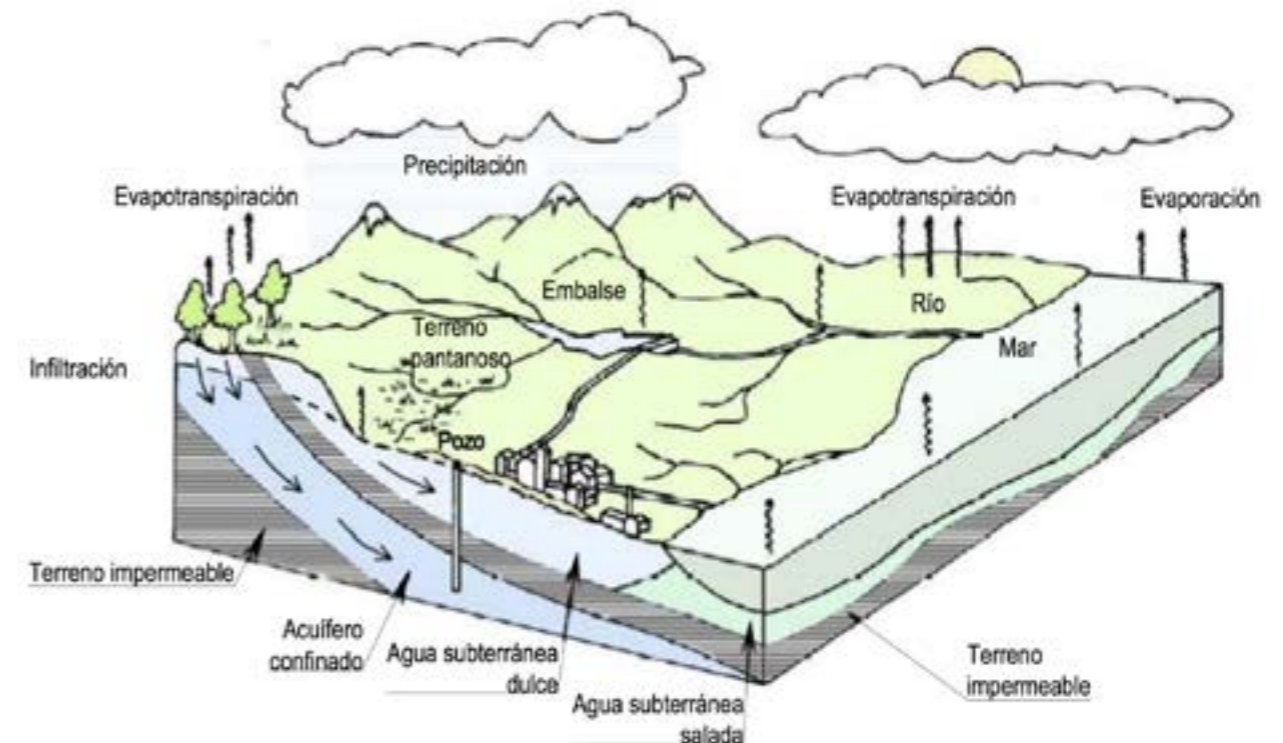
para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2010). Sumado a esto, su importancia económica gira alrededor de las actividades productivas para consumo humano.

La hidrología es una ciencia que estudia el agua, su dinámica, su distribución, movimiento y propiedades en la Tierra y sus relaciones con el ambiente. Para el entendimiento de los principios de esta ciencia se recurre a la descripción y estudio del ciclo hidrológico como la parte medular de ésta. Entender la interacción del agua subterránea con la superficial como parte del ciclo hidrológico, así como con las actividades humanas relacionadas, es básico para establecer el diseño de infraestructura que fomente el cuidado y el uso sostenible del agua.

El ciclo hidrológico describe el movimiento del agua en nuestro planeta pasando por todas sus fases (sólida, líquida y gaseosa) y en todas sus escalas, y por su naturaleza cíclica, no puede establecerse ni un principio ni un final. El ciclo hidrológico se compone de evaporación, condensación y la precipitación que suceden principalmente en la atmósfera; el flujo superficial (escorrentía) que existe cuando el suelo alcanza su capacidad de infiltración, la infiltración en la zona vadosa, la recarga, el ascenso capilar y la evapotranspiración, que suceden en la superficie; y el movimiento del agua en formaciones geológicas (agua subterránea) y las grandes masas oceánicas (Domenico y Schwartz, 1998; Freeze y Cherry, 1979; Fetter, 2001; Schirmer *et al.*, 2013).

En la Figura 1.4 se ejemplifica de manera general el comportamiento del ciclo hidrológico.

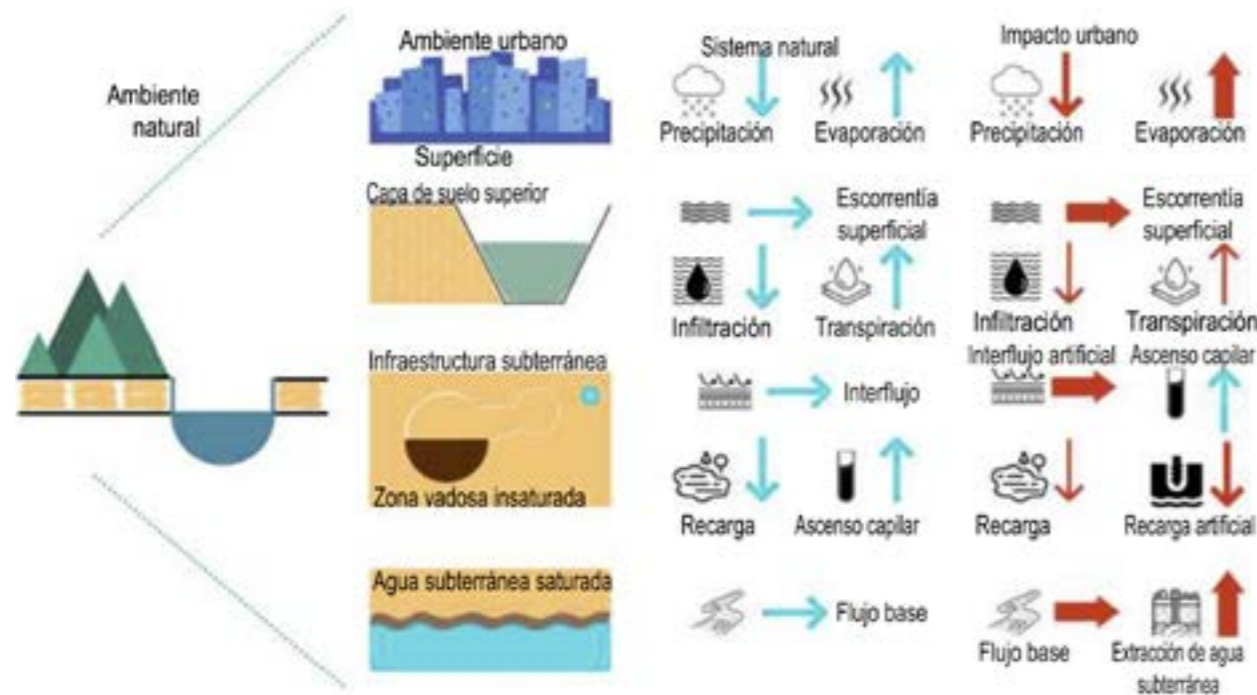
Figura 1.4
Componentes del ciclo hidrológico.



La construcción de la Infraestructura Verde Vial puede repercutir directamente sobre el ciclo hidrológico a micro y gran escala y en diferente grado. La Figura 1.5 presenta un diagrama del comportamiento del ciclo hidrológico en un ambiente natural y bajo modificaciones antrópicas.

Figura 1.5

El ciclo hidrológico de los sistemas de infraestructura natural y urbana. Las flechas que aumentan o disminuyen de tamaño indican un cambio con respecto al ciclo hidrológico anterior. El color de la flecha indica si es parte del ciclo hidrológico natural (azul) o de hidrología urbana (rojo).



Fuente: Modificado de Schirmer et al., 2013.

Los efectos directos de la infraestructura vial, desde un punto de vista hidrológico, pueden resumirse básicamente en lo siguiente (Hernández-Michaca et al., 2000).

I. Azolve de cauces y cuerpos de agua.

Este impacto se manifiesta de forma más significativa en las regiones de sierra con precipitación superior a 600 mm (Eckart et al., 2017). La modificación de relieves con mayor pendiente, debido a la construcción de carreteras de concreto y vías férreas, en zonas con gran precipitación, tiene una consecuencia más acusada sobre la dinámica erosiva y, por lo tanto, favorece el azolvamiento de los cauces y cuerpos de agua (Eckart et al., 2017).

II. Modificación del patrón natural de drenaje.

Los escurrimientos son físicamente más pronunciados en los lugares montañosos expuestos a promedios mayores de precipitación pluvial anual. Por lo tanto, la modificación de los cauces y relieves por la construcción de infraestructura vial ocasiona efectos más adversos en tales regiones.

III. Contaminación.

Las fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas durante la etapa de construcción son la maquinaria y equipo que opera con ese fin; y durante la etapa de operación, los vehículos que transitan sobre la carretera y la maquinaria y equipo que se emplean para el mantenimiento.

El efecto de dilución será mayor bajo condiciones de precipitación pluvial elevada y topografía sinuosa, por el alcance que pueden tener las avenidas de escurrimiento y la facilidad de flujo de agua que permiten las obras pavimentadas y de drenaje que acompañan a la infraestructura vial.

IV. Efecto barrera.

La infraestructura vial se convierte en toda una red de barreras hidrológicas longitudinales que modifican la dinámica hidrológica superficial y subterránea. Ello produce la interceptación, desviación y descarga concentrada de la escorrentía. El efecto barrera para las corrientes de agua superficial es uno de los impactos potenciales más importantes que se pueden producir. Se puede generar un aumento de los riesgos de inundación, en especial en zonas de baja altitud con respecto al nivel de mar, donde la posibilidad de avenidas es mayor. El efecto de corte no se reduce a las aguas superficiales, sino que también puede afectar a los acuíferos libres cuyo nivel estático es próximo a la superficie del terreno, por las excavaciones debidas a la construcción de zanjas y cunetas, entre otras obras que requieran excavación, produciendo un descenso de los niveles piezométricos y afectando localmente el nivel freático.

V. Disminución de la recarga vertical de los acuíferos.

Resulta como consecuencia de las alteraciones de la dinámica hidrológica superficial y subterránea antes descritas, además de la fuerte compactación del suelo que disminuye su capacidad para infiltrar el agua de lluvia, favoreciendo el escurrimiento y la evaporación.

VI. Encharcamientos.

Debido al mismo efecto barrera, se generan concentraciones importantes de volúmenes de agua en un efecto presa, puesto que se interceptan las líneas de flujo de circulación natural (Hammersmark et al., 2008).

VII. Disminución en el volumen de recarga de acuíferos.

Las aguas de escorrentía que no se infiltran suelen ser conducidas a un cauce fluvial, con lo que la tasa de infiltración se reduce considerablemente; otro tanto ocurre si esta agua es conducida a zonas impermeables, donde la tasa de infiltración es nula. La desviación temporal o permanente de caudales es otra de las acciones del proyecto que puede tener incidencia sobre la recarga de acuíferos. Estas desviaciones producen un cambio en los sistemas de escorrentía y en la organización de las aguas superficiales que repercute a muy distintos niveles.

En la mayoría de los casos es posible detectar con anticipación los impactos anteriores y las alteraciones que tendrán sobre el agua superficial y subterránea. Todas estas afectaciones se pueden minimizar y en algunos casos inhibir con la correcta aplicación de la Infraestructura Verde Vial. Actualmente, el objetivo de dichas prácticas es fomentar o incluso restablecer, en la medida de lo posible, el ciclo hidrológico natural que se ve afectado por procesos antropogénicos mediante el uso de técnicas de retención e infiltración del agua (Eckart *et al.*, 2017).

En general, se puede decir que las buenas prácticas constructivas y una buena etapa de diseño pueden lograr que la Infraestructura Verde Vial traiga diversos beneficios en la hidrología. Si bien estos beneficios dependen del contexto de los casos de estudio y, para la finalidad para los que sean creados, se pueden generalizar los siguientes (Brander *et al.*, 2004):

- Reducir las tasas de escorrentía y por lo tanto favorecer la infiltración disminuyendo el efecto barrera y el efecto presa.
- Promover la recarga natural del agua subterránea para apoyar los caudales naturales de los ríos y la recarga del acuífero.
- Reducir la descarga de contaminantes a los cuerpos de agua.
- Servir como un amortiguador para derrames accidentales al evitar que el agua (contaminada) se descargue directamente en arroyos y ríos.
- Reducir la cantidad de escorrentía que se descarga en los sistemas de alcantarillado combinados. De esta manera, la descarga de contaminantes a los cuerpos de agua se reduce y/o evita derrames de desbordamiento combinado al alcantarillado durante las fuertes lluvias.

Cuando se combina con otras infraestructuras puede tener otros propósitos, como por ejemplo la mitigación de las inundaciones, la reducción de la erosión del suelo o la disminución del impacto negativo del cambio en el uso de la tierra. Además, en un proyecto de Recarga de Acuíferos (MAR) la Infraestructura Verde Vial puede ser auxiliar en (Mendoza-Cázares, 2018):

- Reducir la intrusión marina o salina continental.
- Evitar procesos de hundimiento en el terreno.
- Almacenar agua en el subsuelo.
- Mejorar la calidad mediante técnicas de tratamiento de suelos y acuíferos.
- Usar los acuíferos como sistemas de conducción y filtración del agua.

- Reducción o eliminación del descenso del nivel piezométrico.
- Apoyo a determinados esquemas de utilización conjunta o coordinada (por ejemplo: barreras hidráulicas).
- Mantenimiento hídrico de reservas ecológicas o medioambientales.
- Reducción de costos de transporte, almacenamiento o bombeo del agua.
- Dilución del contenido de nitratos, cloruros u otros elementos químicos de las aguas de un acuífero.

1.2.5 El papel de la implementación de energías limpias en la infraestructura vial

El Cambio Climático es un fenómeno reconocido por primera vez en 1896 por el científico sueco Svante Arrhenius, quien afirmaba que la quema de combustibles fósiles liberaba grandes cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera, proponiendo una relación entre los niveles de dióxido de carbono y el incremento global de la temperatura. Actualmente, el Cambio Climático se relaciona directamente con el calentamiento global a nivel mundial y es una consecuencia del incremento de emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero que alteran la composición de la atmósfera. Estas emisiones se derivan de actividades humanas como los procesos industriales, la quema de combustibles de origen fósil (petróleo, carbón y gas natural) y los cambios de uso del suelo.

El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los principales GEI responsables del calentamiento global, los otros gases son el metano, los óxidos de nitrógeno y el monóxido de carbono. En países como E.U.A., el aporte más grande de GEI proviene del sector transporte, ya que sus emisiones de dióxido de carbono alcanzan el 26%. Mientras que la producción de la electricidad para casas, industrias y negocios representaría el 30% (EPA, 2019). En México la mayor parte del transporte se centra en las carreteras, por lo que el transporte particular actualmente es la principal fuente generadora del mayor número de emisiones contaminantes.

El transporte es principalmente impulsado por motores a diésel, estos motores son los causantes de los principales impactos al ambiente, produciendo emisiones tales como el óxido de nitrógeno (NOx), partículas suspendidas (PM, por sus siglas en inglés), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y dióxido de azufre (SO₂).

Las emisiones generadas por el transporte, tales como el dióxido de carbono y los óxidos nitrosos, son los principales precursores en la generación del fenómeno de "efecto invernadero", que contribuye al calentamiento global. En México, de acuerdo con cifras de la Secretaría de Energía, el sector transporte es el mayor consumidor de energía para su operación, esto incluye gasolinas, diésel, combustóleo, naftas, gas licuado, gas seco, electricidad y querosenos, básicamente.⁸

Las tendencias globales que se replican en México muestran que el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte continuarán incrementándose en función del crecimiento económico. Este incremento provoca una mayor demanda derivada de combustibles y de infraestructura.

⁸ Con la siguiente liga se puede consultar el sistema de información energética: <https://sie.energia.gob.mx/>

Considerando lo anterior, el desarrollo de la resiliencia se ha convertido en uno de los principales objetivos de las organizaciones de transporte.

La resiliencia climática es la capacidad de anticipar, prepararse y responder a eventos, tendencias o perturbaciones peligrosas relacionadas con el clima, su variación y las tendencias futuras. En este sentido, el desafío en los últimos años para los países en temas ambientales es la acción global contra el Cambio Climático. Los programas y estrategias de alcance nacional seguidas por los tomadores de decisiones y los gobiernos establecen metas orientadas a reducir dichas emisiones, a esto se le conoce como mitigación del Cambio Climático.

En relación con el Cambio Climático, la Infraestructura Verde Vial puede coadyuvar a la resiliencia de los sistemas de transporte y a la mitigación de los GEI gracias a la posibilidad de satisfacer sus requerimientos de energía eléctrica mediante energías limpias. Para cubrir la demanda energética es necesario innovar en el uso de tecnologías que permitan preservar el clima y la biodiversidad. La eficiencia energética y el uso de energías renovables en los proyectos de Infraestructura Verde Vial prometen ser una opción muy viable para avanzar en el objetivo.

Una de las características de las energías limpias, además de los beneficios ambientales, es la generación distribuida o descentralizada, lo que consiste en la generación de energía eléctrica mediante un gran número de pequeñas fuentes limpias de generación que se instalan cerca de los puntos de consumo. La generación distribuida puede estar basada en la combinación entre la energía generada mediante pequeñas fuentes y la generada mediante centrales convencionales. Esta distribución permite una generación más equilibrada y ayuda a que la Infraestructura Verde Vial no dependa en exceso de las grandes centrales. Además, la generación de pequeñas fuentes implica el uso de las energías limpias, lo que contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Las principales características de la generación distribuida son:

- Reduce las pérdidas en la red eléctrica: al estar más cerca del consumidor las redes de transporte son más cortas, por lo tanto, la generación distribuida supone menos pérdidas de energía en el transporte de la electricidad desde la generación hasta el consumidor. Esto también influye en el ahorro al momento de elevar la tensión eléctrica para su transporte.
- Mejora la fiabilidad y la calidad del sistema eléctrico: como hay pequeñas fuentes de generación repartidas por el territorio, el fallo de una de las fuentes no supone un grave problema para el sistema eléctrico.
- La producción se realiza con fuentes renovables de energía, reduciendo el uso de combustibles fósiles y su dependencia.

La microgeneración consiste en pequeñas fuentes de generación eléctrica distribuidas por toda la Infraestructura Verde Vial, ya sea en el techo de una edificación o en algún elemento público como puede ser una luminaria. Es un sistema que puede satisfacer las necesidades de energía en el sitio donde se requiere, prescindiendo de las líneas de distribución, haciendo que la Infraestructura Verde Vial sea autosuficiente y no dependa tanto de grandes potencias para su abastecimiento.

Existen principalmente dos tipos de microgeneración con energías limpias:

- Sistemas solares fotovoltaicos. En cualquier edificación o elemento público se pueden instalar celdas fotovoltaicas. Este tipo de energía hace que la Infraestructura Verde Vial sea autosuficiente (se abastezca eléctricamente por sí sola) y además existe la posibilidad de que aporte también parte de la electricidad a la red eléctrica si se encuentra cercana a una red de distribución.
- Aerogeneradores. Son pequeños generadores eólicos pensados para instalarse en una fuente de alumbrado, por lo general pública. Su objetivo es que las luminarias se alimenten de manera autónoma. Además, los aerogeneradores pueden aportar a la red la energía que no necesiten para el alumbrado.

En este sentido, el alumbrado público en una autopista o carretera también puede llevar integrada, aparte del aerogenerador, una pequeña celda fotovoltaica que genera electricidad en combinación con el aerogenerador.

La idea es que la infraestructura vial del futuro no solamente proporcione enlaces de transporte de un lugar a otro, sino que también cuente con la posibilidad de producir energía capaz de almacenarse para alimentar el alumbrado público y la señalización. Este es el punto donde la red de energía del transporte se conecta con la red de generación de electricidad cambiando el futuro del paradigma de suministro de energía. Este tipo de infraestructuras ya se están probando en países como Francia (incluso en la entrada de una cabina de peaje de la autopista para alimentar las puertas y las máquinas de pago).

Otro ejemplo de utilización de energías limpias son los sistemas híbridos de energía renovable, que se utilizan para contrarrestar las limitaciones de la energía solar y eólica como fuentes de energía renovable aisladas en condiciones climáticas adversas. Estos sistemas han sido probados en un sistema de iluminación de carreteras híbrido, solar y eólico, totalmente independiente y fuera de la red, de acuerdo con las condiciones geográficas y climáticas del sitio (Adma *et al.*, 2017).

Por otro lado, las carreteras piezoeléctricas son otra forma de generación de energía limpia (Kokkinopoulos *et al.*, 2014) y utilizan dispositivos piezoeléctricos para generar energía eléctrica. Los cristales piezoeléctricos se colocan a unos 5 cm por debajo de la superficie del asfalto y estos cristales se deforman ligeramente cuando los vehículos cruzan la carretera. La deformación del cristal produce corriente eléctrica, por lo tanto, la energía mecánica de los automóviles ahora se convierte en energía eléctrica. Los dispositivos piezoeléctricos han sido desplegados por East Japan Railway Company (debajo de las puertas de la estación de metro en Japón) y por Innowattech Ltd. (debajo de las carreteras en Israel). Según Innowattech, si dichos dispositivos se instalan a lo largo de un kilómetro de carretera, una media de 400 kw de potencia se puede cosechar, lo que es suficiente para alimentar 162 hogares.

En general, hoy en día resulta relevante que los sistemas de transporte se alineen a los requisitos ambientales para reducir su huella de carbono. En este sentido, las energías renovables pueden contribuir considerablemente con las acciones encaminadas a disminuir los gases de efecto invernadero, aunque también se requieren métodos alternativos que ayuden a prevenir, controlar y reducir la contaminación del aire, en particular, reduciendo el consumo de combustibles fósiles y limitando las emisiones y los desechos del sector transporte.

1.2.6 El papel de la sociedad en los ecosistemas y en la infraestructura vial

La forma en que el humano se concibe a sí mismo y el cómo entiende el mundo que le rodea determina los tipos de soluciones que diseña e implementa para hacer frente a sus problemas. En este sentido, el pensamiento sistémico ayuda a reconocer a la humanidad como una entidad socio-biofísica compleja, autoorganizada, multinivel y altamente integrada a lo que hoy se conoce como socio-ecosistema. Este nuevo paradigma ontológico requiere nuevas herramientas epistemológicas y transdisciplinarias para observar el mundo y así evaluar mejor las problemáticas ambientales que enfrenta (Maass y Equihua, 2015). Bajo este enfoque, adoptar una perspectiva sistémica para evaluar y operar sistemas sustentables requiere incorporar actividades participativas, lo cual conlleva una visión y un equipo de trabajo inter y transdisciplinario, donde se debe incluir tanto evaluadores externos como a quienes están directamente involucrados en el espacio a evaluar, como son los agricultores, técnicos, representantes de la comunidad y otros actores.

La participación social en el contexto de las metodologías participativas refiere como el “proceso de interacción social que implica la toma de conciencia crítica en los niveles personal y colectivo. Se refleja en la apropiación de las acciones y las decisiones sobre el propio desarrollo en el fortalecimiento de las formas locales de organización” (Macías-Cuellar *et al.*, 2006).

La ciencia para la sustentabilidad reconoce la importancia de la investigación interdisciplinaria desde distintas visiones para atender preguntas y problemas bajo marcos epistémicos diversos. Identifica la importancia de la transdisciplina como parte del enfoque de investigación y de acción, capaz de involucrar conocimiento y procesos de construcción de conocimientos e innovación tecnológica de grupos e individuos de distintos sectores de la sociedad como son los grupos indígenas, las asociaciones de productores, las organizaciones civiles, las entidades gubernamentales, las empresas, etc., en un diálogo concertado. Esta propuesta reconoce que la complejidad de los problemas ambientales rebasa los enfoques y ritmos de las propuestas que pretenden dar solución a dichos problemas. Por lo tanto, el diálogo de saberes, el intercambio de experiencias técnicas y las prácticas para la comprensión y la atención de problemas es un aspecto crítico al momento de acortar los tiempos para encontrar soluciones (Casas *et al.*, 2017).

La iniciativa y acción de los individuos en los procesos transformadores constituyen piedras angulares sobre las que descansan las metas para la solución de problemas socio-ecológicos. Pero sin duda, las iniciativas individuales y aun grupales suelen ser limitadas. En la medida en que las iniciativas alcancen tal nivel de socialización se podrán lograr metas de mayor trascendencia. En este sentido, las iniciativas individuales y grupales deben aspirar a convertirse en iniciativas institucionales y políticas que transiten de las reglas locales a políticas públicas.

1.3 Marco regulatorio y programas sobre infraestructura verde en México

México ha hecho una gran labor dentro del marco normativo ambiental firmando 77 tratados internacionales o acuerdos interinstitucionales en materia ambiental, de los cuales, en materia de biodiversidad y sus ecosistemas, ha firmado 23 instrumentos. Asimismo, cuenta con una amplia legislación en materia de protección ambiental

(ver análisis del marco normativo en extenso en el Anexo A). Sin embargo, pese a los avances conceptuales, institucionales, jurídicos y de diseño de políticas sobre la gestión del ambiente, en México aún se sigue sin comprender con claridad la dependencia que tienen las actividades económicas con el bienestar humano y la biodiversidad de los ecosistemas. Esto se debe, por un lado, a que la legislación ambiental en el país no necesariamente se maneja de manera holística y, en segundo, a que un reto actual sigue siendo la falta de vinculación de los diferentes instrumentos de planeación y manejo existentes, a través de su implementación efectiva en términos de gobernanza y economía de la conservación. No obstante, hoy en día el enfoque sistémico, la tendencia a la comprensión de los ecosistemas y los socio-ecosistemas, así como los conceptos de paisaje, conectividad ecológica, prevención de desastres, infraestructura verde, entre otros, están tomando un mayor impulso.

En el marco jurídico mexicano existen diferentes leyes que fomentan a nivel nacional, federal, estatal y municipal, las acciones o programas de construcción, mantenimiento y rehabilitación de infraestructura vial, las cuales son sustentadas de manera piramidal, donde la constitución establece la necesidad de preservar y restaurar el equilibrio ecológico, así como a la protección del ambiente en el territorio nacional. De forma subordinada se identifican otras leyes que en el marco jurídico permiten el desarrollo de infraestructura verde, las cuales tienen que ver con los recursos forestales, agua y suelo. Por su parte, la Ley General de Cambio Climático establece disposiciones para enfrentar los efectos adversos de este fenómeno, y establece la necesidad de atender en el territorio mexicano los aspectos que tienen que ver con la protección al ambiente, el desarrollo sustentable, la preservación y la restauración del equilibrio ecológico.

En este tenor, la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Cooperación Alemana al Desarrollo (GIZ, por sus siglas en alemán), en el marco del programa Protección del Clima en la Política Urbana de México (CiClim) han sentado las bases para posicionar a la infraestructura verde como una acción para contribuir a la mitigación y adaptación al Cambio Climático, sumando a otros actores que trabajan el tema desde distintos frentes para comenzar a construir un entendimiento en torno al mismo. Para su implementación generaron un documento llamado “Implementación de infraestructura verde como *Estrategia para la Mitigación y Adaptación al Cambio Climático en Ciudades Mexicanas, Hoja de Ruta*”.

El documento tiene como objetivo establecer una hoja de ruta que incluya los pasos a seguir para la implementación de acciones de infraestructura verde en ciudades mexicanas. En concordancia con ello, el primer capítulo se enfoca a la revisión conceptual y descripción de algunas de sus principales características y los beneficios que aporta. Con estos antecedentes se explica su vínculo con el Cambio Climático en materia de mitigación y adaptación. Posteriormente se presentan los ejes en los que se puede insertar la infraestructura verde, como son la planeación urbana, servicios ecosistémicos y movilidad urbana sustentable que, además, forman parte de los componentes del programa Protección del Clima en la Política Urbana de México antes mencionado.

Ciudades como Hermosillo y Mérida han comenzado a sentar bases para implementar proyectos de infraestructura verde conformando normas y programas para su aplicación. No obstante, también son de reciente aparición.

Finalmente, destacan acuerdos que México ha firmado en temas ambientales como son el Acuerdo de París sobre Cambio Climático; la Agenda 2030 que incluye 17 objetivos, entre ellos fomentar el desarrollo de ciudades y comunidades sustentables y el Marco Sendai para reducir sustancialmente el riesgo de desastres y de pérdidas ocasionadas por los desastres. En todos ellos, la construcción de infraestructura verde cobra gran relevancia ya que confiere herramientas para cumplir los objetivos pactados en términos de sustentabilidad. En el Anexo A se muestra una Tabla resumen con el marco jurídico nacional e internacional que aplica a la construcción de infraestructura verde.

1.4 Casos de éxito de la implementación de la Infraestructura Verde Vial en otros países

Una infraestructura vial segura y eficiente es sumamente importante para la economía y la sociedad. La expansión de la red de carreteras o vías férreas, sin embargo, trae aparejadas consecuencias ecológicas que desde hace relativamente poco tiempo conocemos y entendemos. La Ecología de Carreteras, en este sentido, es una nueva disciplina de la ciencia aplicada que une a la ecología y la ingeniería, y se enfoca a los múltiples impactos de la infraestructura vial sobre el ambiente. Hoy día hay pocas experiencias de la aplicación de los principios de ecología de carreteras, no obstante, la expectativa del crecimiento poblacional y las inversiones de infraestructura vial actual en la mayoría de las regiones, unida al incremento en la preocupación para mantener la conectividad ecológica regional, genera gran interés en los estudios y aplicación de la Infraestructura Verde Vial como una nueva herramienta de conservación.

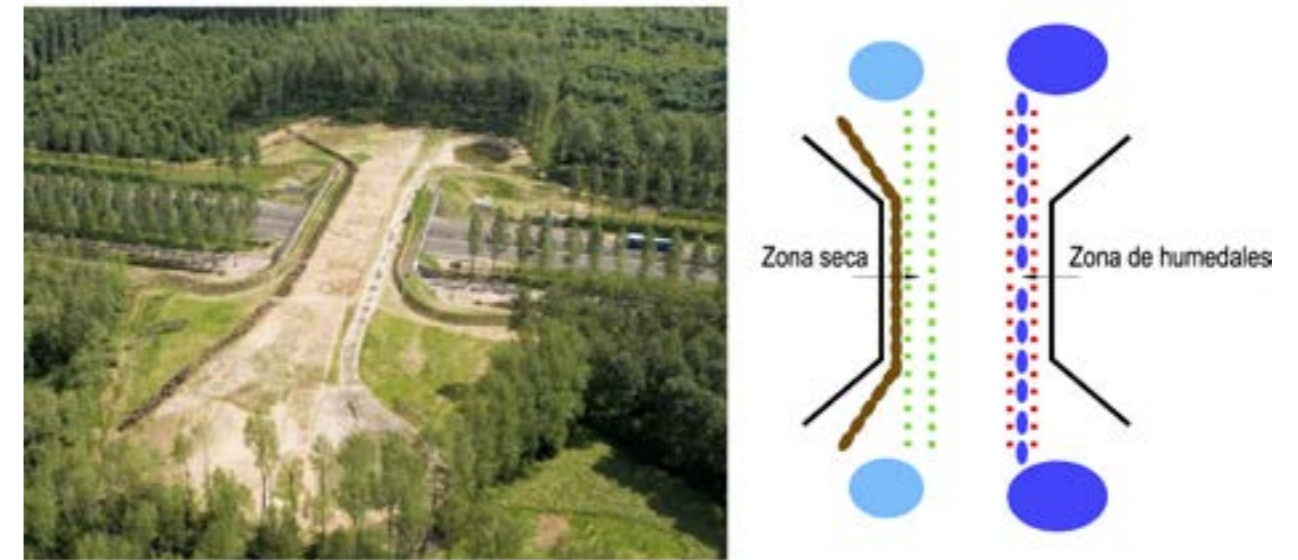
Existen varios estudios a nivel de investigación que demuestran la relevancia de la implementación de este tipo de técnicas, pero son pocos los ejemplos que se tienen de su implementación y, aún menos, de los monitoreos para determinar los casos de éxito. No obstante, a continuación se muestran algunos de ellos.

1. Puente Natural de Groene Woud (Holanda).

Este puente natural es el primero en su tipo en los Países Bajos, conecta áreas naturales de humedal y resulta ser una de las más grandes innovaciones en Infraestructura Verde Vial, ya que no sólo es un paso para fauna, sino que, además, su diseño y construcción se encuentra orientada a restablecer los servicios ecosistémicos del espacio en que se inserta.

El puente se encuentra en el corazón del paisaje nacional de Holanda, en un área húmeda debido al estancamiento del agua en capas francas poco profundas. La zona se caracteriza por presentar un paisaje cultural a pequeña escala con pastizales, piscinas, bancos boscosos, arbustos y bosques húmedos de álamos.

Figura 1.6
Puente y corredor ecológico en Groene Woud (Holanda).



Fuente: Tomado de van der Grift et al., 2010.

Lo especial del puente natural de Groene Woud es que se ha construido una serie de piscinas a lo largo de todo el puente natural y rampas en el nivel del agua subterránea y, además, en la cubierta del puente el agua puede regularse con una bomba y un sistema de drenaje. Su tecnología permite drenar el exceso de agua en periodos húmedos y suministrarla en periodos secos.

Este puente se divide en cuatro zonas, cada una de aproximadamente 10 m de ancho. En el lado norte, la zona irregular con un suelo ligeramente arcilloso rico en nutrientes, se tiene una pared a lo largo de todo el puente natural y las rampas, que proporciona cobertura a las especies de animales pequeños durante su paso. La parte media del puente natural consiste en una zona cubierta de hierba en suelos arenosos pobres en nutrientes y un área con siembra de matorrales.

Posterior a las zonas antes mencionadas, se ha creado una zona húmeda continua también conocida como “zona de anfibios” en el lado sur del puente natural. Esta zona húmeda consiste en una lámina de retención de agua y una capa franca con una serie de piscinas poco profundas (hasta 0.3 m de profundidad) que drenan lentamente el agua como una especie de sistema en cascada a las dos piscinas de aproximadamente 2 m de profundidad a cada lado del puente natural. En periodos secos el agua se bombea desde una piscina cercana hasta la parte superior del puente.

Figura 1.7

La zona húmeda poco después de la construcción, que consiste en una serie de piscinas de margas que se alimentan de agua desde la parte superior del puente natural.



Fuente: Tomado de Van Der Grift et al., 2010.

El propósito específico del nivel de agua subterránea en la cubierta del puente, de la zona húmeda y las rampas, es aumentar la posibilidad de que los anfibios, incluidas ciertas salamandras (*kamsalamander*), usen el puente.

II. Carreteras con recubrimiento vegetal para controlar la erosión, mitigar el ruido y captar CO₂

La vegetación y los suelos a lo largo de los caminos son de interés para el secuestro del carbono y en conjunto, son capaces de controlar la erosión. Algunos ejemplos de buenas prácticas en el diseño de la cobertura vegetal en carreteras se muestran a continuación:

La Strada Regionale 222, conocida como la Chiantigiana, que discurre entre Florencia y Siena por los viñedos en los que nace el vino más famoso de la Toscana, Italia, es una carretera con apenas 80 Km, con las colinas tapizadas de cultivos de olivos y viñas.

Figura 1.8

Carretera en la Toscana Italia.



Fuente: Tomado de Vicente, 2008.

En Bélgica, algunas carreteras tienen un paisaje rural donde abundan los prados, molinos y vacas. Se protegen las travesías de pueblos mediante pantallas visuales y acústicas construidas a base de arbolado. Los árboles son de gran porte, lo que puede ayudar a reducir el ruido a no más de 55 decibelios (dB) de día.

En México, la NOM-080- ECOL-1994 que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido proveniente del escape de los vehículos automotores, motocicletas y triciclos motorizados en circulación y su método de medición, indica un máximo de 99 dB (A)⁹ en el caso de vehículos de mayor tamaño (hasta 10,000 kg), y de 86 dB para los vehículos de hasta 3,000 kg. No obstante, la Organización para la Cooperación Económica y Desarrollo (OCDE) propone como límite máximo aceptable 70 dB(A) para el horario diurno en una carretera ya construida, siendo deseables valores de hasta 50 dB(A) en vías nuevas durante la noche (Torrás et al., 2003).

En este sentido, las barreras naturales son una solución para reducir el ruido de las carreteras a niveles aceptables por los estándares internacionales y nacionales.

⁹ Nivel de presión sonora continuo equivalente para un periodo de ocho horas, en decibeles con ponderación A.

Figura 1.9
Barrera natural anti ruido en carretera de Holanda.



Fuente: Imagen satelital, tomada de Google Earth para ejemplificar. Consulta 2021.

III. Sistemas de drenaje urbano sustentable.

En Escocia, el avance hacia los sistemas de drenaje urbano sustentable se ha consolidado. El crecimiento en el número de estos sistemas ha sido impresionante. Particularmente las cunetas verdes o franjas filtrantes por mencionar algunas, se han utilizado durante varios años y han mostrado su eficiencia para tratar la escorrentía de las carreteras al eliminar los sedimentos, los metales pesados por asociación y los aceites. Los estudios sugieren que los drenes filtrantes pueden proporcionar alrededor del 70-80% de eficiencia de remoción de sedimentos y alrededor de 80-90% de eficiencia de remoción de metales. El desempeño de la calidad del agua de drenajes con filtro bien diseñados, construidos y mantenidos puede ser altamente satisfactorio.

Figura 1.10
Cuneta húmeda en una calle residencial en Illinois, Estados Unidos de América.



Fuente: The First Street Corridor.

IV. Energías Limpias.

Desde la perspectiva de la energía y las emisiones de GEI, el transporte ferroviario se encuentra entre los modos de transporte más eficientes energéticamente y con menos emisiones. No obstante, también es el sector de transporte más electrificado, donde tres cuartas partes de los movimientos de pasajeros y la mitad de los trenes de mercancías dependen de la electricidad (Brenna *et al.*, 2020).

Varios ejemplos de generación fotovoltaica instalados en el sector ferroviario se llevan a cabo actualmente sin aumentar el uso del suelo, lo que alivia efectivamente la contradicción de la oferta y la demanda de energía, contribuyendo a un transporte ecológico con bajas emisiones de carbono que también promueve el desarrollo de la generación de energía renovable para la transformación energética (Jia *et al.*, 2020).

Aplicaciones de energía fotovoltaica en trenes de China y Japón han demostrado que el transporte impulsado por energía solar es un enfoque prometedor para el transporte sostenible con más energía renovable y menos emisiones de carbono (Hayashiya *et al.*, 2014; Jia *et al.*, 2020). En consecuencia, el enfoque de aprovechar al máximo el papel cada vez más importante de la generación fotovoltaica en el propio espacio disponible del ferrocarril juega un papel importante en el suministro de energía ferroviaria.

En las carreteras, algunos sistemas de energía renovable utilizan luz solar, mientras que otros utilizan las vibraciones mecánicas producidas por los vehículos cuando atraviesan la carretera para generar energía eléctrica. La energía solar capturada en las carreteras se puede utilizar para alimentar alumbrado público y la señalización vial. En los Estados Unidos de América se han desarrollado módulos solares que incluyen microprocesadores para comunicación inteligente y luces de diodos emisores de luz (LED) para la señalización, así como elementos calefactores para derretir nieve y hielo.

V. Manual de Infraestructura Verde Vial de Colombia.

El departamento del Guaviare con el apoyo de la Fundación Moore, WWF Colombia, en compañía del gobierno de Colombia, la ministra de Transporte y el ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible, lanzaron como proyecto piloto la publicación de un manual de Infraestructura Verde Vial. El objetivo de esta herramienta es prevenir, mitigar y corregir posibles impactos negativos indirectos y directos para los ecosistemas y las personas, además de integrar criterios de Cambio Climático y optimizar el manejo de materiales durante la ejecución de los proyectos de infraestructura vial. Asimismo, se espera que con la aplicación de estas estrategias se logre disminuir los costos de construcción y conservación de carreteras.

1.5 Oportunidades de desarrollo de la Infraestructura Verde Vial en México

En términos generales, en México el concepto de Infraestructura Verde Vial es aún emergente, ya que se tiene poco desarrollado desde el punto de vista conceptual y técnico. En este sentido, esto representa una oportunidad de desarrollo de material de consulta y metodológico que apoye el trabajo de tomadores de decisiones del área.

En México, la diversidad de ecosistemas y su amplia multifuncionalidad, la diversidad de especies, sobre todo la diversidad de niveles taxonómicos mayores (género, familia), y su gran nivel de endemismos, son los principales factores que hacen que este país pertenezca al grupo de países megadiversos (Mittermeier *et al.*, 2004).

Dado el alto potencial ecológico que presenta México como país megadiverso, se tiene un alto potencial, pero sobre todo necesidad de implementar elementos que pueden formar parte de una red de infraestructura verde que acompañe a cualquier proyecto de construcción, desde su instalación en espacios protegidos para la conservación de la biodiversidad, hasta las áreas verdes urbanas o campos de cultivos. En este sentido, en todos los estados del país existen áreas naturales bajo algún estatus de protección o incluso zonas que no se manejan bajo esta legalidad, pero se protegen por la misma sociedad como áreas de relevancia ecológica y cultural. Estas

áreas son importantes porque podrían constituir áreas focales a partir de las cuales se podría planificar a gran escala una red de Infraestructura Verde Vial que facilite la conectividad a través de la creación de corredores ecológicos que contribuyan a disminuir la fragmentación ocasionada por la misma infraestructura vial en el país.

Derivado de la amplia diversidad ecológica y cultural que presenta el país, existe un número considerable de elementos de infraestructura verde que pueden ser incorporados a la infraestructura vial a lo largo y ancho del país, desde espacios protegidos para la conservación de la biodiversidad hasta áreas verdes urbanas o la red de setos en los márgenes de los campos de cultivos.

A grandes rasgos, en la siguiente tabla se mencionan algunas áreas de oportunidad para la implementación de la Infraestructura Verde Vial a escala regional en nuestro país.

Tabla 1.2
Áreas de oportunidad en México para la implementación de la Infraestructura Verde Vial.

Oportunidades de implementación de Infraestructura Verde Vial en México			
Infraestructura Verde Vial	Tipo de servicio	Tipo de clima	Regiones o áreas de oportunidad
Terrazas de declive	Infiltración	Húmedo	Áreas del país donde la precipitación anual es mayor de 800 mm o las características de permeabilidad y profundidad de los suelos, propician la acumulación excesiva de agua que es necesario desalojar hacia una salida natural o artificial debidamente protegida. Por ejemplo, áreas de planicie en zonas húmedas.
Terrazas de nivel	Almacenamiento	Semiáridos /áridos	Áreas del país donde las precipitaciones son menores de 800 mm anuales, o donde los suelos son profundos, con buena permeabilidad y capaces de retener toda el agua de lluvia.
Cunetas verdes	Transporte	Todos menos desérticos/áridos	Particularmente zonas del país con lluvias considerables y procesos de erosión de suelo muy avanzado, ya que éstas permiten reducir la velocidad de los escurrimientos y facilitan la infiltración del agua localmente.

CAPÍTULO 2

PLANEACIÓN: IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES Y OPORTUNIDADES PARA IMPLEMENTAR INFRAESTRUCTURA VERDE VIAL

Oportunidades de implementación de Infraestructura Verde Vial en México			
Infraestructura Verde Vial	Tipo de servicio	Tipo de clima	Regiones o áreas de oportunidad
Jardín microcuenca en derecho de vía	Conservación de polinizadores	Todos los ecosistemas	Particularmente zonas tropicales secas y/o húmedas presentan la mayor diversidad de polinizadores (mariposas, colibríes y murciélagos son los más representativos); seguido de bosques templados y desiertos (murciélagos, colibríes, abejas y mariposas).
Energía solar	Generación de energía	No aplica	Zonas de mayor radiación solar como las zonas norte y centro del país.
Energía eólica	Generación de energía		Zonas con mayor viento, por ejemplo La Ventosa en Oaxaca, Tamaulipas, Coahuila, por mencionar algunos.
Pantallas acústicas	Control de ruido		Zonas urbanas y/o rurales cerca de poblados en el país.
Pasos para fauna	Conectividad	Todos	En todo el país, particularmente donde se identifiquen corredores ecológicos.
Bajo puentes verdes y/o culturales	Lúdico y recreativo	Todos	Zonas urbanas y/o rurales, pero también en cualquier área conformando pasos para fauna como corredores ecológicos.

Generalidades

La planeación estratégica de la Infraestructura Verde Vial no es un tema que se pueda señalar de manera única o mediante un manual de pasos a seguir perfectamente definidos para alcanzar cierta meta. Es decir, no se tienen reglas definidas o imperativas establecidas, ya que la elaboración del análisis surge en la medida del diálogo entre las diferentes disciplinas que aportan su conocimiento dependiendo del problema a enfrentar (los objetivos) y de las necesidades y particularidades de cada región en donde se pretende construir la infraestructura.

En este sentido, un aspecto fundamental es el análisis integral del proyecto de Infraestructura Verde Vial, incluso desde la primera etapa en que se realiza el estudio de costo-beneficio dentro de los lineamientos para inclusión en cartera de proyectos y programas de inversión de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). Lo anterior, con la finalidad de tomar mejores decisiones para el desarrollo de proyectos que incluyan los ejes de la sustentabilidad.

En este punto es necesario aclarar que dado el carácter socioambiental del tema que compete al presente Manual, la responsabilidad hoy en día para mejorar nuestras prácticas en pro del ambiente, sobre todo cuando se trata de actividades de extracción y/o construcción, recae en el conjunto de actores involucrados en los proyectos de infraestructura vial, y las acciones que se toman a la fecha recaen en la buena voluntad de quien las propone o del grupo multidisciplinario (idealmente comprometido con la sociedad y el ambiente) que lleve a cabo dichas acciones.

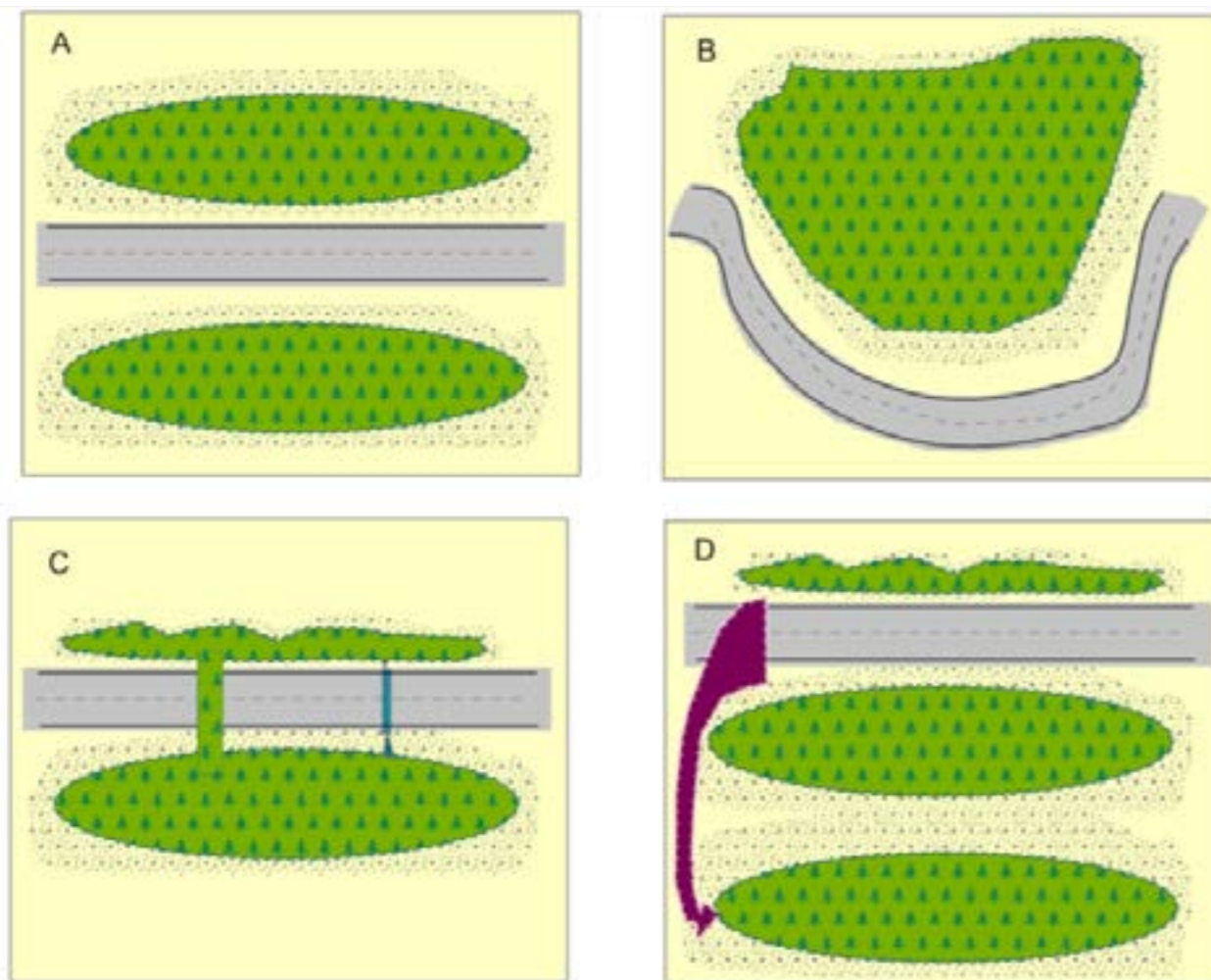
Es necesario introducir el principio de prevención (evitando incurrir en espacios de alto valor socioambiental) desde el momento de la concepción de la Infraestructura Verde Vial. De aquí deriva el éxito para que un proyecto pueda o no ser sustentable y, sobre todo, funcional, de acuerdo con los objetivos planteados y que mediante su realización se pueda evitar, reducir y/o compensar los impactos negativos que ha de tener sobre los humanos y los ecosistemas en todas sus etapas como proyecto.

Se pretende que con la planeación se reduzcan los costos ambientales, sociales y económicos derivados de los impactos que podría ocasionar la infraestructura vial y que, además, se pueda contribuir a mitigar los efectos del Cambio Climático.

En este sentido, los costos (en términos de esfuerzo, tiempo y dinero) suelen multiplicarse cuando se aplican únicamente medidas correctoras y compensatorias de las afectaciones ambientales, en lugar de anticiparse con un conjunto de medidas preventivas. Tal como se puede apreciar en la Figura 2.1, las medidas de prevención, corrección y compensación para la fragmentación de un ecosistema provocada por una carretera variarán en costos y éstos dependerán en gran medida de los estudios previos y de la planeación realizada.

Figura 2.1

Representación esquemática de: A) Fragmentación de un ecosistema, B) Medida preventiva, C) Medida correctora (pasos para fauna) y D) Medida compensatoria. Se representa en color verde la vegetación propia del ecosistema y en punteado gris la vegetación de borde.



Fuente: Tomado de Luell, 2003.

En áreas de gran interés socioambiental, una sola medida para mitigar o compensar los daños no será capaz de sustentar los servicios ecosistémicos perdidos y en general, será necesario construir un conjunto de obras de infraestructura verde para poder compensar dichas pérdidas. Esto nuevamente se traduce en costos que derivarán en tiempo, dinero y esfuerzo, sin mencionar que las medidas ambientales compensato-

rias que por ley se establecen al fragmentar los ecosistemas, son altamente costosas en términos monetarios, y complejas de ejecutar en muchas ocasiones.

Como enfoque general, entre mayor complejidad socioambiental tenga la ruta elegida, mayores serán los costos requeridos para la construcción y operación del proyecto, dado que la complejidad ambiental se traduce en trámites de autorización, inversiones en mitigación, esfuerzos de negociación, tiempos de resolución, entre otros esfuerzos. La idea es planear el trayecto de la infraestructura vial a fin de evitar áreas ambientales y socialmente importantes en la medida de lo posible. Un ejemplo de este tipo de planeación se tiene descrita en el *Manual de diseño de pasos para fauna silvestre en carreteras* elaborado por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT (2020).

El presente capítulo busca establecer parámetros, lineamientos y métodos para llevar a cabo la planeación de Infraestructura Verde Vial, que oriente hacia su proyecto ejecutivo, con el objetivo de garantizar el éxito de su implementación en términos socioambientales y contribuir con la construcción de proyectos sustentables.

2.1 Estrategia por seguir en la planeación de la Infraestructura Verde Vial

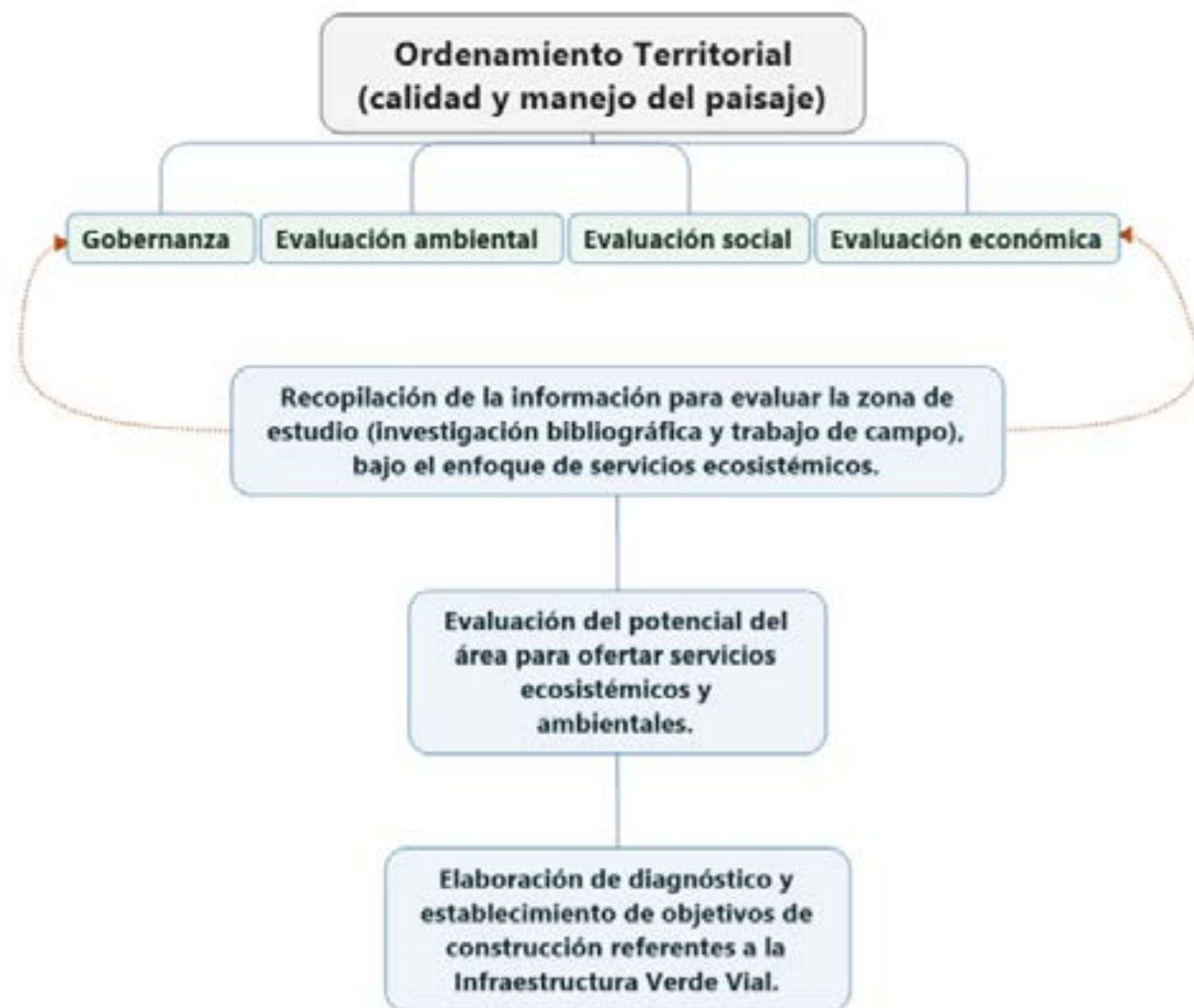
Encontrar soluciones integrales y satisfactorias para todos los actores participantes en proyectos de infraestructura vial es uno de los mayores retos de la planificación. Para ello se requieren criterios, datos y métodos que permitan evaluar el costo-beneficio del proyecto, considerando todos los factores, como los costos ambientales, sociales, tecnológicos entre otros necesarios, así como la definición de mejores alternativas.

En primera instancia se deberá considerar la formación de un equipo multi y transdisciplinario que ayude a planificar y a construir un proyecto sustentable, ya que éste exige la visión integrada de un grupo de trabajo dispuesto a usar y fusionar su conocimiento para construir nuevos planteamientos. Desde el punto de vista de la planeación de proyectos de Infraestructura Verde Vial, éstos deberán plantearse con una visión que permita, por un lado, reducir al mínimo los costos de construcción, mitigación, compensación y monitoreo y, por otro, brindar servicios benéficos a mediano y largo plazos para la población humana y los ecosistemas; Es decir, no sólo mitigar los efectos ambientales y sociales adversos, sino que la infraestructura deberá aportar por sí misma beneficios ecosistémicos y sociales.

El estudio de la zona determinada constituye uno de los primeros pasos en la planificación, ya que debe contemplar la identificación de áreas límites para la construcción de la infraestructura vial, derivadas en primera instancia por la legislación ambiental y en segundo y no menos importante por elementos de interés ambiental donde se identifiquen funciones del ecosistema necesarios para mantener la vida de cualquier población.

La planeación debe considerar, también, etapas de rectificación de estrategias en caso de ser necesario.

En este capítulo se presenta un marco general de consideraciones que se deben plantear para la implementación de una Infraestructura Verde Vial. La Ruta de trabajo se presenta en la Figura 2.2.

Figura 2.2**Ruta de trabajo para la planeación de la Infraestructura Verde Vial.**

2.1.1 Ordenamiento territorial, calidad y manejo del paisaje

El modelo de desarrollo territorial y crecimiento urbano (tal y como actualmente se ejecuta en la totalidad de las regiones y zonas metropolitanas del país) funciona de un modo anárquico a causa de una multiplicidad de factores, que se reflejan en el territorio nacional. En el país, la infraestructura vial por lo general actúa en dos sentidos: como borde infranqueable de crecimiento o como catalizador del desarrollo suburbano. Su diseño, su geometría, la adecuación a la accidentada orografía nacional, la incorporación de nuevas vías de mayor velocidad, sus áreas de servicio y de conservación, etc., se reflejan como cicatrices en el territorio y como suelo subutilizado dentro del panorama territorial.

El grado de afectación que esto puede acarrear hacia el modelo de desarrollo urbano y sobre todo a la concepción del suelo como un recurso “no renovable”, (concepto hasta ahora poco valorado en el continente americano, es significativo con la previsión de los actuales planes de infraestructura vial).

Por ello, es necesario abrir la posibilidad de responder de manera calificada a la realidad de las iniciativas de desarrollo urbano aislado y local, a través de propuestas que vayan desde lo más especulativo, como el crecimiento de las ciudades en torno a polos de desarrollo que significan las infraestructuras, hasta la generación de herramientas de diseño para las políticas institucionales administrativas, que colaboren a paliar esta realidad de vida subdesarrollada y que afectarán a la larga el ambiente, el hábitat humano y, por consiguiente, la sustentabilidad del mismo.

Para la adecuada distribución territorial en proyectos de infraestructura vial, se debe valorar, conservar y/o transformar con una visión integral el ecosistema y el paisaje. En este sentido, la infraestructura verde deberá contemplar en sus objetivos el aprovechamiento máximo del suelo como un bien no renovable y deberá enfatizar desde la transformación la conservación y realce del paisaje, como parte de los componentes sustanciales que brindan servicios ecosistémicos.

En el ordenamiento territorial, el establecimiento de programas de trabajo intersectoriales redundará en el desarrollo económico, territorial, ambiental y urbano, además del cultural y social, ya que es necesario entrelazar éstos en los planes y los programas rectores de la esfera nacional, para que se establezcan a través de sus planes y programas sectoriales las acciones conjuntas, programadas y presupuestadas, que ayuden a la prelación de iniciativas planificadas de manera armónica en el territorio.

La coordinación desde los tres órdenes y poderes de la administración pública de los bienes nacionales es indispensable. Numerosos esfuerzos se han realizado, pero es preciso hacerlo de manera constante y como tema prioritario al inicio de las administraciones. En tal sentido, la conciliación (y gobernanza) con los distintos niveles de gobierno (federal, estatal y municipal), además de la creciente participación ciudadana en la toma de decisiones, es de vital importancia para conseguir un desarrollo armónico entre regiones socioambientales y los proyectos que en ellas se insertan.

El financiamiento del proceso mencionado, a través de los mecanismos de coparticipación establecidos en programas sectoriales tiene una importancia de igual trascendencia donde se podrán utilizar esquemas como el de la asociación público-privada para su concreción, pero siempre tutelados por los líderes de las finanzas y la administración pública, quienes pueden cuidar que los programas sectoriales se encuentren debidamente programados y, preferiblemente, que estén bien establecidos de forma cruzada con otros sectores y dependencias. Todo ello, en el marco y concepción de los servicios ecosistémicos y su relación con el bienestar social como elementos de desarrollo sustentable.

Se deben elaborar los estudios de las regiones en donde se desarrollan los proyectos de Infraestructura Verde Vial, estableciendo los parámetros de crecimiento y desarrollo tendenciales. Asimismo, se deben de sentar las bases para el desarrollo de estudios y proyectos específicos sectoriales alineados a estos estudios integrales de gran visión, donde se desarrollen los proyectos de Infraestructura Verde Vial.

Las líneas de acción se plantean a continuación:

I. En materia de gobernanza.

Generar desde la normativa aplicable a nivel de administración pública, las condiciones para la integración de las iniciativas sectoriales en planes, programas y proyectos interinstitucionales.

Se incluyen de manera enunciativa: reformas constitucionales, modificaciones a las leyes orgánicas de la administración pública, leyes y reglamentos de ley sectoriales, elaboración de planes y programas de desarrollo nacional y sectoriales.

En este nivel, las diferentes instancias, dependencias, entes y agentes que intervienen en la transformación del territorio asociado al proyecto de Infraestructura Verde Vial, deben establecer los ejes sobre los cuales se deban de regir los agrupamientos, proyectos y acciones que se establezcan necesarios. Como ejes, se pueden poner en distintos niveles de preponderancia los objetivos sectoriales que cumplan con el prospecto para el cual están planteados. Asimismo, se agrupan las iniciativas y proyectos junto con las acciones que los acompañen, en grupos de trabajo y estrategias para cumplir las metas establecidas.

II. En el aspecto ambiental.

Uno de los principales atractivos de infraestructura verde es su capacidad para realizar múltiples funciones ecosistémicas. Los beneficios se expresan en funciones y servicios que brindan los ecosistemas, que son la base de la infraestructura verde. Incluyen servicios de soporte, de provisión, de regulación y culturales. La identificación de estas funciones en el área de estudio es clave para establecer los objetivos de la Infraestructura Verde Vial.

III. En el aspecto social.

Desarrollar los procesos necesarios de consulta, conciliación y definición con la sociedad, de los planes, programas y proyectos a desarrollar. Esto se hará mediante la comunicación, publicación y socialización de proyectos; desarrollo de foros y talleres de participación social; así como de la socialización de resultados de estos procesos y su determinación.

IV. En el aspecto económico o de financiamiento de proyectos de Infraestructura Verde Vial.

Implementar los mejores esquemas para planear, construir y operar los proyectos. Ya sea a través de la tutela y administración de los bienes nacionales por las dependencias federales y sus empresas paraestatales, desconcentradas o cualquiera otra figura implementada por el Estado, o bien, a través de la colaboración entre la Iniciativa Privada (IP) y la administración pública de los bienes del estado. Es vital para la implementación, el desarrollo, la operación y el mantenimiento (hasta el propio desmantelamiento) de cualquier proyecto que se diferencia previamente de los esquemas financieros idóneos para toda su fase de vida.

2.1.2 Recopilación de la información para evaluar la zona de estudio bajo el enfoque de servicios ecosistémicos y ambientales

La planeación empieza por la evaluación de la zona de estudio, ya que debe contemplar la identificación de áreas limitantes para la implementación de la infraestructura vial, derivadas en primera instancia por la legislación ambiental y en segundo, y no menos importante, por elementos de interés socioambiental del sitio donde se desarrolle la infraestructura vial.

A continuación, se mencionan algunos estudios de base que deben incluirse para realizar una primera evaluación ambiental de la zona, tanto en gabinete como en campo, así como los análisis y/o fuentes para obtenerlos.

2.1.2.1 Evaluación de gabinete

En esta etapa se deberán consultar e investigar bases de datos espaciales, estudios y en general realizar un estudio bibliográfico sobre la zona de interés. También se requiere el uso de *software* que permita realizar un análisis espacial para caracterizar el área a partir de sistemas de información geográfica y percepción remota.

El *software* permite:

- Manejar información vectorial o ráster.
- Consultar estudios y bases de datos espaciales con información ambiental.
- Procesar funciones que permitan generar modelos espaciales para comprender el funcionamiento o la dinámica socio-ecosistémica.

A continuación se presentará una secuencia de los procesos que se deben realizar para obtener resultados de una primera caracterización y evaluación ambiental de la zona.

La Tabla 2.1 sugiere algunos estudios de relevancia ambiental, variables que pueden ser usadas y métodos y fuentes para obtener la información. Los estudios son enunciativos y orientativos más NO limitativos. Son los que se manejan de manera general en el país para realizar una primera caracterización ambiental desde gabinete.

Tabla 2.1
Secuencia lógica de procesos que se deben llevar a cabo para obtener una primera caracterización de la condición ambiental del área de estudio. Información de entrada en gabinete.

Análisis que deben ser elaborados	VARIABLES REQUERIDAS PARA EL ANÁLISIS	MÉTODOS/BASES DE DATOS PARA OBTENER LA INFORMACIÓN
Diagnóstico ambiental general de la zona de estudio	<p>Información general sobre el municipio, localidades, población total, densidad de población, servicios de la población, grupos indígenas, actividades económicas principales, ejidos, características hidrológicas principales, ecosistemas, riesgos.</p> <p>Vegetación (programas de manejo forestal entre otros), suelo, hidrología, geología, topografía, áreas de interés ambiental, cultura, gobierno y en general cualquier estudio geográfico.</p> <p>Clima, precipitación, temperatura.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Programas de Ordenamiento Ecológico y Territorial, Planes municipales, etcétera. Bases de datos de INEGI, CONABIO, CENAPRED, etcétera. Estaciones meteorológicas UNIATMOS.
Análisis del paisaje y su conectividad (Ficha 1)	Información sobre Geología, Geomorfología, Edafología, Hidrología, Vegetación y usos del suelo, etcétera.	<ul style="list-style-type: none"> INEGI y CONABIO.
Análisis de vegetación y uso de suelo (Ficha 2)	Tipo de vegetación, estado de la vegetación.	<ul style="list-style-type: none"> Cartas vectoriales de vegetación y uso de suelo, (INEGI, CONABIO, CONAFOR). Imágenes satelitales. Índices de vegetación (NDVI, EVI y NDWI, etc.). Datos de muestreo o verificación en campo.
Análisis de suelo (Ficha 3)	Tipo de suelo, características ecológicas y físicas.	<ul style="list-style-type: none"> Bases de datos de INEGI.
Análisis hidrológico (Ficha 4)	Enfoque y delimitación de cuenca.	<ul style="list-style-type: none"> Modelo ArcSwat.
	Parámetros climatológicos (precipitación, evapotranspiración, temperatura, duración del periodo de lluvias).	<ul style="list-style-type: none"> UNIATMOS, INEGI (SIATL). Estaciones meteorológicas. Proyectos hidrológicos realizados para la obra. Comisión Nacional del Agua.
	Información sobre el caudal de escurrimiento como elemento principal en el diseño de las obras. Características geohidrológicas del subsuelo para obras de recarga e infiltración, entre otras.	<ul style="list-style-type: none"> Algunas páginas que pueden ser consultadas son las siguientes: https://www.gob.mx/65asalle/acciones-y-programas/consulta-la-base-de-datos-del-repda https://app.conagua.gob.mx/sistemasdeagua/ http://sina.conagua.gob.mx

Análisis que deben ser elaborados	VARIABLES REQUERIDAS PARA EL ANÁLISIS	MÉTODOS/BASES DE DATOS PARA OBTENER LA INFORMACIÓN
Análisis del agua subterránea (Ficha 4)	Información de instrumentación geotécnica.	<ul style="list-style-type: none"> Estudios geotécnicos realizados para la infraestructura vial.
Análisis de Viento (Fichas 6 y 7)	Cantidad de viento en la zona.	<ul style="list-style-type: none"> Estaciones meteorológicas.
Análisis de salor (Fichas 6 y 7)	Radiación solar.	<ul style="list-style-type: none"> MDE.
Zonas de Importancia antrópica y cultural (Ficha 8)	Zonas de recreación, ecoturismo, espirituales y/o sagrados, sitios de inspiración, identidad, presencia indígena, índices de marginación, agrodiversidad y agroecosistemas, etcétera.	<ul style="list-style-type: none"> Documentos en general de la zona de estudio y bases de datos del INEGI, INAH, INPI, CONABIO, etcétera.
Análisis topográfico	Clasificación de las características del relieve (pendiente, orientación y altitud). Delimitación de la cuenca, subcuenca y microcuencas. Riesgos topográficos.	<ul style="list-style-type: none"> Bases de datos del INEGI: mapa topográfico y MDE. Modelo ArcSwat: MDE, SIATL. Mapas genéricos de riesgos (CENAPRED).
Análisis de la heterogeneidad geológica del terreno	Geología y geofísica.	<ul style="list-style-type: none"> Fuentes electrónicas oficiales (p. ej. el Servicio Geológico Mexicano). Trabajos técnicos del gobierno. Artículos científicos. Investigaciones independientes. Tesis.
Parámetros climáticos y de Cambio Climático	Precipitación, Temperatura, Evapotranspiración, Riesgos hidrometeorológicos.	<ul style="list-style-type: none"> Bases de datos de estaciones meteorológicas, UNIATMOS, CENAPRED, INECC, IPCC, etcétera.
Riqueza de especies de flora y fauna	Especies presentes en el área de estudio.	<ul style="list-style-type: none"> Bases de datos de CONABIO, GBIF, etcétera.
Zonas de importancia ambiental	ANP, Corredores ecológicos, áreas de conservación, zonas de importancia epicontinental, etcétera.	<ul style="list-style-type: none"> Bases de datos de CONABIO, ANP, INEGI.
Áreas de implementación de Infraestructura Verde Vial	Infraestructura verde existente.	<p>Programas, planes y estrategias de:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ordenamiento Territorial. Ordenamiento Ecológico. Desarrollo Urbano (Nacional, Estatal, Municipal, Parcial). Movilidad Urbana (Estrategia de Movilidad Urbana Sustentable).

Fuente: Modificado de Trinidad-Lora, 2021.

Con la información recabada se deberá llevar a cabo un primer análisis sobre las condiciones de la región donde se desarrollará el proyecto de Infraestructura Verde Vial, misma que será útil para delimitar posteriormente el área de estudio y planificar el trabajo en campo.

Actualmente existen diversos paquetes de sistemas de información geográfica de descarga libre o bajo licencia, que permiten analizar información espacial. Por mencionar ejemplos de herramientas cibernéticas (*software*) más conocidas se tienen las siguientes:

- QGIS, descarga libre.
- SVSIG, descarga libre.
- SNAP, descarga libre.
- ArcGIS, requiere licencia.
- ENVI, requiere licencia.
- ERDAS, requiere licencia.

La primera caracterización ambiental es importante en todas las etapas y, además, permite identificar aspectos sociales y culturales que son importantes para la toma de decisiones. En la mayoría de los casos, identificar las necesidades de los actores locales facilita la planeación del proyecto y el diálogo para llegar a acuerdos y consensos entre las partes interesadas.

2.1.2.2 Evaluación de campo

Todo análisis de gabinete debe corroborarse en campo, en particular la información que no se encuentra actualizada, no tiene alta resolución o no evidencia los cambios temporales, tal es el caso de las imágenes de cambio de uso de suelo. Estas visitas permitirán corroborar la información de gabinete y mejorar la información.

En la Tabla 2.2 se sugieren algunos estudios de relevancia ambiental que son importantes de verificar y evaluar en campo, así como variables que deberán ser analizadas para obtener el estudio y/o métodos que se llevarán a cabo para obtener la información de interés. No son limitativos y dependerá de cada región el tipo de estudios, no obstante, se presentan los más comunes y de mayor relevancia.

Posteriormente, se presentan fichas que acompañan y complementan la información para obtener los resultados de los estudios expuestos en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2
Secuencia lógica de procesos que se deben llevar a cabo para obtener una primera caracterización de la condición ambiental del área de estudio. Información de entrada en campo.

Análisis que deben ser elaborados	Factores requeridos para el análisis	Métodos/o actividades para obtener la información
Análisis del paisaje y su conectividad (Ficha 1)	Información sobre geología, geomorfología, edafología, hidrología, vegetación y usos del suelo, etcétera.	Verificación en campo.
Análisis de vegetación y uso de suelo (Ficha 2)	Tipo de vegetación, estado de la vegetación, diversidad de especies.	Muestreo en campo.
Suelo (Ficha 3)	Análisis edafológico.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo</i> (Siebe et al., 1996). • <i>Guía para la descripción de perfiles de suelo</i>. http://www.fao.org/soils-2015/resources/fao-publications/news-detail/es/c/263275/
Análisis hidrológico (Ficha 5)	Enfoque y delimitación de cuenca.	Estudios hidrológicos realizados para la infraestructura vial.
Análisis del agua subterránea (Ficha 5)	Información de instrumentación geotécnica.	Estudios geotécnicos realizados para la infraestructura vial.
Análisis de viento (Fichas 6 y 7)	Cantidad de viento en la zona.	Torre con sensores que registran los vientos a diferentes alturas (anemómetro).
Análisis de radiación (Fichas 6 y 7)	Radiación solar en el área.	Estaciones meteorológicas locales.
Zonas de Importancia antrópica y cultural (Ficha 8)	Zonas de recreación, ecoturismo, espirituales y/o sagrados, sitios de inspiración, identidad, presencia indígena, índices de marginación, agrobiodiversidad y agroecosistemas, etcétera.	Encuestas y entrevistas a profundidad, talleres participativos para la exposición, discusión y toma de decisiones de las comunidades.
Análisis de la heterogeneidad geológica del terreno	Geología y geofísica.	Estudios geotécnicos realizados para la infraestructura vial.
Parámetros climáticos y de Cambio Climático	Precipitación, temperatura, evapotranspiración, riesgos hidrometeorológicos.	Estación meteorológica local.
Riqueza de especies de flora y fauna	Especies presentes en el área de estudio.	Muestreos en campo.
Áreas de implementación de Infraestructura Verde Vial	Infraestructura verde existente.	Visitas al sitio y marchas exploratorias, encuestas y entrevistas a profundidad, talleres participativos.

Fuente: Modificado de Trinidad-Lora, 2021.

Las siguientes fichas temáticas son complementarias a la Tabla anterior y describen algunos procedimientos metodológicos que serán de utilidad para obtener los análisis de la Tabla 2.1, la Tabla 2.2 y la Tabla 2.6. Esta información es relevante para la planeación de proyectos de Infraestructura Verde Vial, específicamente para la selección y diseño de los componentes o estructuras que se implementarán en materia de conectividad ecológica, vegetación, suelo, hidrología y energías renovables.

Ficha 1
EVALUACIÓN DE LA CONECTIVIDAD ECOLÓGICA: ESTRATEGIAS A SEGUIR SEGÚN LAS NECESIDADES DE PERMEABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL

Fase de aplicación:

Todas las fases de un proyecto. Esta información no es exclusiva para alguna fase del proyecto, ya que puede ser requerida en cualquiera de ellas.

Precepto o requerimientos:

Software:

- ArcGIS.
- Circuitscape.

Estos *softwares* permitirán manejar, procesar y analizar información espacial referente a la conectividad ecológica. En términos generales se requiere la siguiente información:

- Información cartográfica.
- Selección de áreas y especies focales.
- Modelo de idoneidad del hábitat.
- Identificación de corredores ecológicos.
- Evaluación de la conectividad del ecosistema.

Criterios metodológicos:

Uno de los objetivos clave de la gestión del paisaje es aumentar su conectividad ecológica. En este sentido, una de las estrategias para cumplir con este cometido, es el mantenimiento o la construcción de corredores ecológicos. Los corredores de conservación de conectividad se han convertido en una piedra angular de la biología y la práctica de la conservación. Para este punto, en el *Manual de diseño de pasos para fauna silvestre en carreteras*, en el capítulo 2 de Planeación (Dirección General de Servicios Técnicos, 2020), se presenta cómo evaluar e identificar los corredores ecológicos en

un área determinada. Por lo que se usará este manual para complementar la planificación en compañía del presente manual. Resaltando su utilidad para la planificación de pasos para fauna (estructuras también catalogadas como infraestructura verde) y para identificar sitios con potencial para permeable los corredores ecológicos de la zona, a través de la implementación de medidas de mitigación en compensación por la construcción, y así realizar un proyecto integral donde todas las acciones sumen a construir sistemas sustentables.

Para identificar los corredores ecológicos que necesitan ser permeados, se requiere evaluar la respectiva calidad. Para ello se explican los siguientes criterios metodológicos.

I. Identificación de cuellos de botella.

Una vez que se han mapeado los corredores (Dirección General de Servicios Técnicos, 2020), se utiliza la teoría de circuitos para ejecutar la evaluación del achurado óptimo dentro de los corredores resultantes. Esto da como resultado identificar y mapear los puntos de quiebre o donde se dan fenómenos de cuellos de botella dentro de los trazos de los corredores identificados (McRae, 2012).

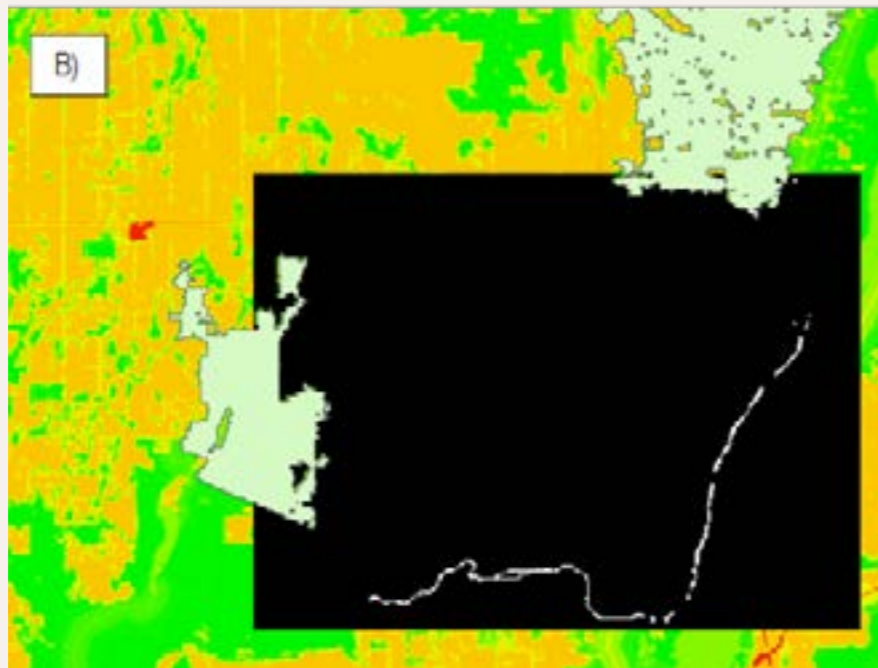
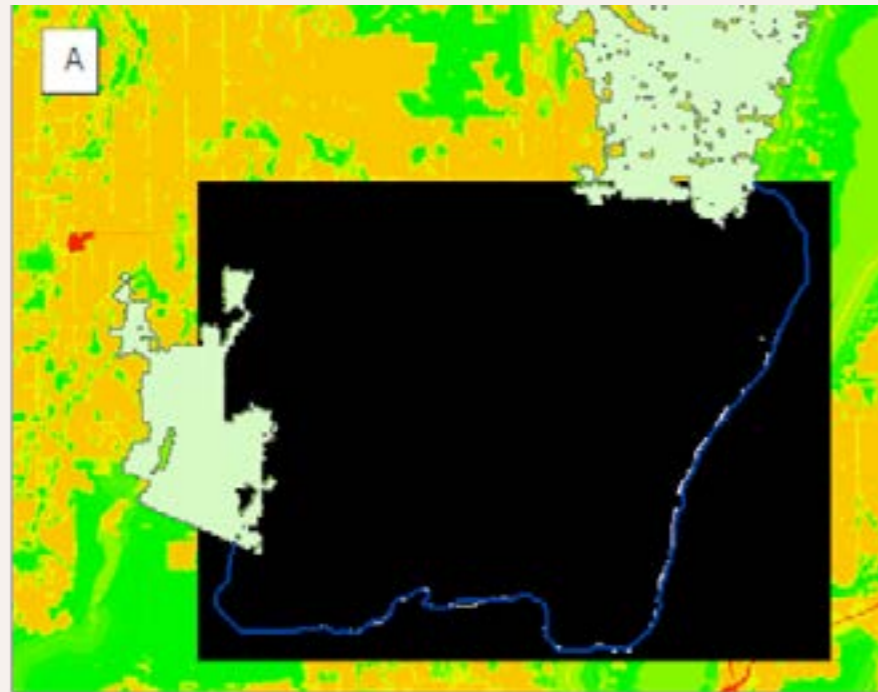
Los cuellos de botella representan áreas donde el ancho del corredor se acota y, por lo tanto, pueden ser particularmente limitantes para mantener flujos de fauna. Castilho *et al.* (2015) menciona que “Incluso una pequeña pérdida de área en estos puntos de quiebre o cuello de botella comprometería de manera desproporcionada la conectividad ecológica para una especie”, y debe ser considerado, sobre todo si ésta es una especie focal.

En este paso, la distancia ponderada por costo (CWD en inglés) es uno de los factores importantes, ya que son las distancias geográficas modificadas por los valores de resistencia, capa que representa el coeficiente de movilidad de especies dentro del hábitat (Gallo y Greene, 2018; Montano, 2014; Puerto-Marchena y Muñoz-Reinoso, 2010). En este caso, el especialista deberá determinar la distancia necesaria para evaluar a los corredores dependiendo de la especie focal.

En la Figura 2.3, del lado A, se tiene un ejemplo de un corredor potencial identificado, mientras que en la Figura 2.3, lado B, se pueden identificar las áreas donde se deben implementar estrategias de infraestructura verde para que el corredor sea funcional.

Figura 2.3

- A) Corredor potencial identificado,
 B) Demuestra cómo los primeros tramos del corredor no cumplen con los requerimientos para permear el paso.



II. Identificación de barreras por resistencia.

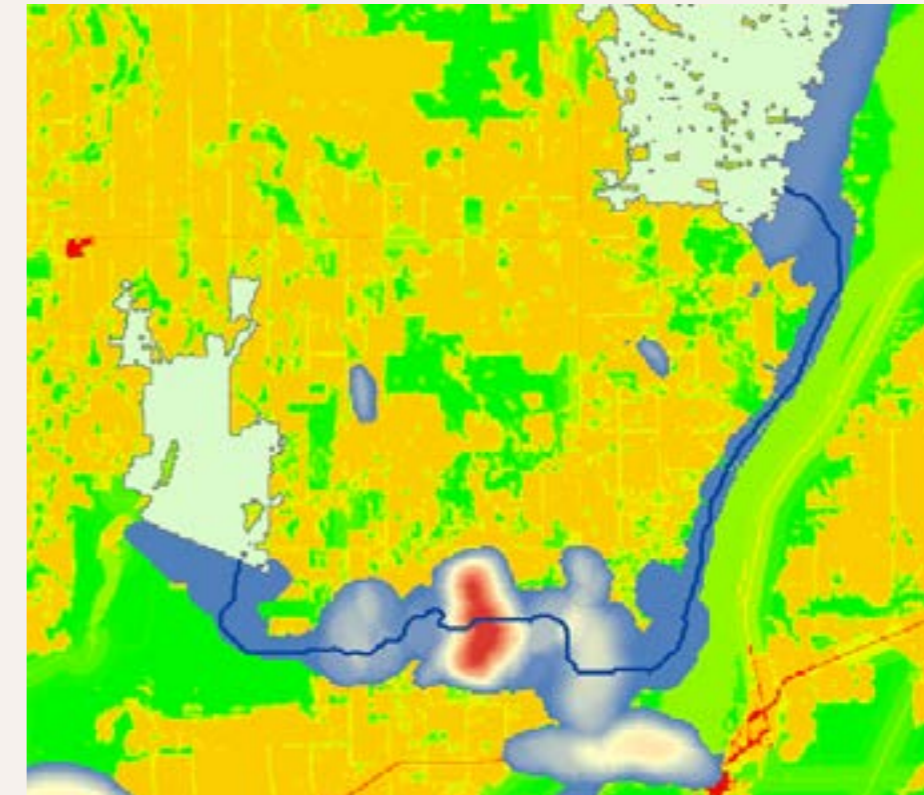
Otro programa que ayuda a identificar afectaciones en los corredores modelados es el denominado Barrier Mapper, que cuantifica la importancia de las barreras o cuellos de botella (McRae, 2012). Igual que en el caso anterior, el mapeo de estos cuellos permite identificar a partir del mapa de resistencia dónde se tienen zonas que limitan el desplazamiento de la vida silvestre (especie focal) para saber hacia dónde enfocar los esfuerzos para realizar una restauración o la aplicación de técnicas de infraestructura verde que podrían mejorar la conectividad ecológica.

La interfaz requiere un valor de detección mínimo de radio, lo cual identificará a estos efectos barrera dentro de los corredores potenciales. El efecto barrera se identifica a partir de sitios donde la distancia entre parches presenta valores altos de resistencia, por lo que se asigna un valor de distancias ponderadas en función de los costos entre las áreas centrales.

La Figura 2.4. muestra el uso de un umbral de 1 km de radio de distancia, pero el especialista deberá definir este valor dependiendo de la aptitud de la especie para permanecer en sitios de bajo valor de idoneidad.

Figura 2.4

Ejemplo de identificación de barreras ecológicas usando Barrier Mapper. Las zonas en rojo indican áreas donde deberían implementarse planes de restauración ecológica para mejorar la continuidad del corredor.



**Ficha 2
EVALUACIÓN DE LA VEGETACIÓN**

Fase de aplicación:

Todas las etapas del proyecto.

Precepto o requerimientos:

La evaluación de la vegetación es una estrategia que se debe considerar desde la etapa de la planeación con motivo de identificar sus características y funciones, pero también para identificar acciones necesarias que deberán incorporarse o ejecutarse en todas las etapas del proyecto. En este sentido, las plantas nativas son la primera consideración y opción para revegetar cualquier proyecto de Infraestructura Verde Vial, ya que éstas, por un lado, son la base de las funciones ecológicas, influyendo en la conservación del suelo, la vida silvestre, el hábitat de polinizadores, las comunidades de plantas y la calidad del agua; y, por otro lado, son la clave también para mantener en determinado momento la resiliencia de la Infraestructura Verde Vial.

A continuación se enlistan algunos aspectos de relevancia que deben considerarse para la incorporación de la revegetación en proyectos de Infraestructura Verde Vial, mismos que son únicamente una referencia y no de carácter limitativo.

Tabla 2.3
Criterios metodológicos para evaluar la vegetación.

Fase	Participación multidisciplinaria recomendada	Herramientas de análisis/estudios	Acciones ejecutadas por fase	Entregable
Actividades previas a la revegetación/ reforestación	Ingenieros, ingenieros en transportación, especialistas en SIG, arquitectos del paisaje, botánicos, forestales, genetistas, edafólogos, especialistas en restauración ecológica y especialistas en protección ambiental.	<ul style="list-style-type: none"> Modelo digital de elevación, imágenes y/o fotografías satelitales, red hidrográfica, carta de uso de suelo y vegetación, compilación de información de factores ambientales y vegetación, bases de datos de especies, cartas de las áreas naturales protegidas (ANP) federales, estatales y municipales, cartas de la red de infraestructura y transporte planes y programas urbanísticos y ordenamientos, zonas voluntariamente destinadas a la conservación o áreas de interés ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> Determinar los objetivos generales y particulares para el proyecto, desarrollo de un plan de revegetación, recopilación y análisis de la información cartográfica y bibliográfica, selección de áreas a revegetar y reforestar y las unidades de revegetación, identificar los sitios de referencia, determinar corredores biológicos, selección de las especies para la revegetación y reforestación. 	<ul style="list-style-type: none"> Ubicación de los corredores biológicos. Listado de especies a utilizar en la revegetación y reforestación. Determinar las actividades previas a la revegetación, rescate y/o abastecimiento de plantas. Mapa de revegetación con la descripción de las unidades. Mapa con los sitios de referencia y de colecta de semillas. Cantidad de plantas por rescatar, por comprar, total de plantas que se utilizarán en la revegetación.
	Ingenieros, arquitectos del paisaje, botánicos, forestales, genetistas, edafólogos, especialistas en restauración ecológica.	<ul style="list-style-type: none"> Implementación de técnicas de recuperación de suelos, elaboración de tecnosuelos. 	<ul style="list-style-type: none"> Tratamientos en suelos de sitios previamente seleccionados. Compra de planta. Establecimiento o renta de un vivero, incluyendo insumos para su operación. Obtención de los materiales para revegetar (semillas, esquejes). 	<ul style="list-style-type: none"> Especificación y desarrollo de las actividades de recuperación de suelos. Plantas rescatadas a lo largo del trazo. Compra de plantas. Plantas nativas propagadas en vivero.

Fase	Participación multidisciplinaria recomendada	Herramientas de análisis/estudios	Acciones ejecutadas por fase	Entregable
Identificación de superficies para el restablecimiento de la vegetación	Arquitectos del paisaje, botánicos, forestales, genetistas, edafólogos, especialistas en restauración ecológica.	<ul style="list-style-type: none"> Técnicas de propagación de plantas por semilla. Técnicas para el establecimiento de árboles, arbustos, hierbas y pastos. Diseño de plantaciones. Aplicación de enmiendas. Delimitación de sitios. Limpieza de los sitios a revegetar y reforestar. Habilitación de caminos para acceder a los predios. 	<ul style="list-style-type: none"> Identificación de las zonas de siembra. Técnicas de siembra: manual (al boleto, presionando contra el suelo), mecánica, hidrosiembra, banco de semillas. Mejoramientos topográficos, limpieza y transporte de planta. Establecimiento de la plantación. Revegetación por estolones y tepes. Diseño de la plantación: marco real, tres bolillo, plantación por cavidades, islas. Apertura de cepas, aplicación de enmiendas. Los materiales que se pueden utilizar en la delimitación son postes y alambre de púas, rocas a manera de tecorales, cercas vivas con esquejes. Maquinaria necesaria para la rehabilitación de los caminos, se deberá evitar daños en la vegetación existente. 	<ul style="list-style-type: none"> Superficies en las que se aplicó la técnica de siembra. Superficies en las que se aplicó la técnica de plantación. Cantidad de plantas herbáceas, pastos, arbustos y árboles empleados en la revegetación y reforestación.

I. Consideraciones para el rescate de la vegetación previo a la construcción.

El rescate de la vegetación es una de las etapas más importantes de la planeación, para ello se dan las siguientes recomendaciones:

- Se deberán formar grupos de trabajo para realizar el rescate de las plantas en la zona del proyecto. Los integrantes de cada cuadrilla portarán una identificación que avale la actividad a la que estarán sujetos, así como la hoja de comisión de la empresa que los contrató para prestar sus servicios.
- Se realizará un recorrido en el trazo antes de iniciar las actividades de desmonte y despalme, a fin de identificar los grupos y tipos de plantas vulnerables, así como prever las técnicas que se podrán implementar para su rescate.
- Ya que se haya inspeccionado la zona de manera detallada, se iniciará el rescate de manera formal, para ello se hará de pleno conocimiento al superintendente de la obra de las actividades que se ejecutarán y la prioridad que tiene el rescate.
- Los rescates deberán ser georreferenciados, inventariados, identificados a nivel de especie, etiquetados y fotografiados.
- Es preciso que el supervisor ambiental programe una plática con los trabajadores de las obras de desmonte y despalme para que conozcan al grupo de rescate, las actividades a desarrollar, la importancia del rescate y de los ejemplares a rescatar. Asimismo, se solicitará su cooperación para que, si en determinado momento se identifica algún ejemplar o ejemplares que ameriten ser rescatados dentro del área de la línea de ceros, sea notificado a la cuadrilla de rescate.
- Se colocarán carteles que especifiquen las prohibiciones de la extracción de flora y fauna en el área del proyecto, así como la sanción punitiva a la que serán sujetas aquellas personas que sean sorprendidas en dicha acción.
- Se ubicará y georreferenciará el sitio que fungirá como vivero temporal o área de confinamiento temporal; en este lugar serán depositados los ejemplares que requieran un tratamiento de sanidad o un albergue temporal mientras se localiza un sitio adecuado para su reintroducción.
- La ubicación debe ser seleccionada de forma estratégica de tal manera que se encuentre cercano al área de trabajo de la cuadrilla.

También se pueden establecer técnicas que fomenten la supervivencia de los organismos en el campo, estas estrategias son:

- Control de enfermedades.
- Asegurarse de que los organismos lleguen sanos al campo.
- Someter a los organismos a condiciones semejantes a las que tendrán en el campo.
- Ubicar a las especies de acuerdo con su distribución natural.

- Asegurarse de que los organismos que se establecen bajo la sombra de nodrizas sean colocados bajo árboles o arbustos al reintroducirse.
- Llevar a los individuos al campo sólo hasta que tengan la edad adecuada.
- Realizar la plantación después de dos semanas establecidas las lluvias, así se reducirá el estrés hídrico de los organismos.
- En la medida de lo posible, será deseable que las plantas reciban riego si no llueve durante varios días.

II. Otras consideraciones en la relación vegetación-suelo-geoforma.

El éxito de la plantación dependerá en gran medida de la preparación del terreno, por lo cual es necesario detectar con precisión aquellas características negativas que más afectarían el establecimiento de las plantas y trabajar en revertirlas artificialmente. A continuación se presentan las principales limitantes de dichos terrenos y la forma de tratarlos.

- Suelos compactados.

Tienen la particularidad de presentar escaso espacio poroso dentro del suelo, lo que dificulta el desarrollo de las raíces y la penetración del agua dentro del suelo. Por lo general, en estos suelos, al reducirse la infiltración del agua y aumentar el escurrimiento superficial, se presentan fuertes problemas de erosión, sobre todo cuando están ubicados en terrenos con pendientes elevadas (mayores a 20%). Cuando se ubican en un terreno plano y se presentan lluvias torrenciales que rebasen la capacidad de infiltración de agua del suelo y la capacidad de evapotranspiración potencial del medio, pueden presentarse inundaciones temporales o permanentes.

La forma de revertir la compactación del suelo es a través de la roturación del terreno, el cual se puede realizar por medio de maquinaria, tracción animal o manualmente, según lo permitan los recursos de que se disponga y la topografía del terreno. De lo que se trata es de remover el suelo tanto como sea posible y darle más porosidad, para que pueda ser capaz de infiltrar mayor cantidad de agua y permita el crecimiento radicular de las plantas. Es recomendable remover el suelo a una profundidad de 40 a 50 cm, en ocasiones estas profundidades implican hacer un subsoleo.

Si por naturaleza el suelo es muy pesado y presenta gran cantidad de arcilla, revertir la compactación por medios físicos es poco viable, pues la descompactación durará poco tiempo. En este caso, a la remoción del suelo se debe sumar la incorporación de materia orgánica (hojarasca o esquilmos agrícolas), o tecnosuelos, con la finalidad de darle mayor volumen.

Para el caso de los terrenos que presentan pendientes mayores a 20%, se corre el riesgo de aumentar el proceso erosivo al encontrarse el suelo removido y sin una cobertura vegetal que la proteja. En estas circunstancias se sugiere trabajar el terreno por franjas sobre la línea de plantación o en su defecto en el entorno del sitio en donde se introducirá la planta (ver Capítulo 3, apartado de terrazas).

Cuando el terreno es rocoso, es decir cuando se tiene la exposición de rocas y/o afloramientos litológicos en la superficie del terreno, lo único que resta es detectar los sitios en que se da un acumulamiento de suelo que permita la introducción de la planta, pues no existe forma práctica de revertir esta deficiencia. En lo que se tendrá que poner mayor cuidado es en elegir especies cuyo sistema radicular sea de desarrollo horizontal o rupícolas, aunque no sean leñosas, se busca que formen suelo como los nopales o magueyes y algunas crasuláceas, ya que, de lo contrario, las especies con prominente desarrollo vertical de la raíz pueden sufrir deformaciones que repercutan en la afectación de la planta.

- Maleza.

Es muy común encontrar que el terreno esté cubierto por plantas leñosas o arbustivas de difícil erradicación y que van a presentar una dura competencia a la vegetación que se introduzca. Para controlar la vegetación se sugiere hacerlo de forma manual.

Esta alternativa consume gran cantidad de tiempo y mano de obra. Consiste en eliminar con machete y otras herramientas agrícolas las plantas que cubren el terreno. Tienen como ventajas que el deshierbe puede ser selectivo al dejar en pie las plantas que puedan tener algún beneficio en la recuperación de la vegetación. La materia orgánica proveniente del deshierbe puede ser acumulada en los sitios donde se introducirá la planta, dejarla en el sitio a manera de cubierta protectora, o revolverla con el suelo que estará en contacto con la planta que se introducirá, para dejarle mejores características al suelo. Se sugiere hacerlo en franjas por dos razones, reducir la superficie a preparar y no dejar desprotegida las zonas en donde no se introducirá la planta.

- Deficiencias nutricionales.

En los suelos que han estado expuestos al aprovechamiento agropecuario y forestal es común encontrar deficiencias físicas y nutricionales. Por lo general, las deficiencias que más afectan el desarrollo de las plantas son la falta de nitrógeno, fósforo y potasio, aunque también es frecuente encontrar bajos niveles de bases como el calcio o el magnesio.

La detección precisa de cuáles son las deficiencias físicas y nutricionales que presenta el suelo es de vital importancia para subsanarlas y revertir sus efectos, para ello, pueden realizarse pruebas en laboratorio.

En primera instancia lo aconsejable es introducir aquellas especies que sean tolerantes y aptas a condiciones adversas, pero también es posible usar fertilizantes o técnicas para formar tecnosuelos que ayuden a recuperar las deficiencias encontradas. Otra manera es proporcionar los cuidados necesarios a la planta en un vivero y trasplantar con cepellón, nunca a raíz desnuda.

En el caso de una siembra directamente con semilla es necesario realizar el acondicionamiento del suelo de acuerdo con las necesidades de cada planta que se desee introducir. En caso de utilizar especies que presenten la particularidad de asociarse con micorrizas y/o bacteriorrizas, que ayudan a la planta a asimilar fósforo y nitrógeno para lograr la inoculación de la semilla, es muy factible que no sea necesario fertilizar.

Ficha 3
EVALUACIÓN DEL SISTEMA EDÁFICO

Fase de aplicación:

Planeación.

Precepto o requerimientos:

Los suelos son el resultado de la interacción de los compartimentos roca, clima y organismos distribuidos en el espacio por el relieve. La identificación de estas características biofísicas permite conocer a diferente escala la distribución de los diferentes tipos de suelos en el espacio y que por lo tanto pueden ser afectados durante la construcción de una infraestructura lineal. Conocer sus características y vulnerabilidad a la degradación permitirán buscar opciones en la planeación y diseño de una Infraestructura Verde Vial para protegerlo y conservarlo.

Criterios metodológicos:

Para reconocer el estado en que se encuentra el suelo de estudio se debe analizar y verificar en sitio la siguiente información:

- El mapa geológico a escala 1:250000 o mayor detalle.
- Precipitación.
- Geomorfología.
- Vegetación y uso de suelo.
- Mapa edafológico.

Posteriormente se llevan a cabo las siguientes acciones:

I. Delimitación de los edafosistemas implicados en el área de la infraestructura vial.

La identificación de los suelos como edafosistemas implicados en el proyecto de Infraestructura Verde Vial se aborda a partir de la delimitación del área de influencia del proyecto. Esta etapa requiere información a mayor detalle, además de procesos de verificación en campo para ampliar la información de las propiedades de los suelos identificados. Así da lugar a la segmentación del paisaje en unidades de suelo más discretas y al conocimiento de sus propiedades para entender la vulnerabilidad al impacto de las actividades de la obra.

Es importante realizar una verificación en campo de las unidades de suelo y realizar el levantamiento edáfico de al menos un perfil por unidad para corroborar propiedades macroscópicas e identificar otras propiedades. Con esta información será posible realizar evaluaciones edafoecológicas que permitan conocer las capacidades de los suelos por unidades identificadas. Para ello, se requiere utilizar manuales de descripción de perfiles de suelo y evaluación edafoecológica, tales como:

- *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo* (Siebe et al., 1996).
- *Guía para la descripción de perfiles de suelo*. <http://www.fao.org/soils-2015/resources/fao-publications/news-detail/es/c/263275/>

II. Identificación de los servicios ecosistémicos del suelo en la zona de la Infraestructura Verde Vial.

Con base en las unidades de suelos y la superficie que ocupan los suelos en el área de influencia se identifica el potencial de Servicios Ecosistémicos que brindan de acuerdo con la Tabla 2.4. En ella se incluyen las propiedades de los suelos que determinan principalmente su capacidad para cumplir cada función.

Tabla 2.4
Indicadores físicos, químicos y biológicos de calidad del suelo.

Indicador	Relación con las funciones y condiciones del suelo
Indicadores físicos	
Textura del suelo	• Retención y transporte de agua y minerales; erosión del suelo a partir de su influencia en el tipo de estructura, la cantidad y tamaño de poros.
Profundidad del suelo	• Estimación del potencial productivo y de erosión, profundidad fisiológica.
Infiltración y densidad del suelo	• Potencial de lixiviación, productividad y erosión.
Capacidad de agua disponible	• Agua disponible para las plantas.
Porosidad y compactación	• Retención y transporte de agua y nutrimentos; erosión del suelo.
Estabilidad de agregados	• Erosión potencial, infiltración de agua.
Indicadores químicos	
Materia orgánica (C y N)	• Disponibilidad de nutrimentos, fertilidad del suelo, estabilidad de agregados, a mayor cantidad: disminución de la erosión y aumento del potencial productivo.
pH	• Actividad química y biológica, límites para el crecimiento de las plantas y actividad microbiana.
Conductividad eléctrica	• Actividad microbiológica, límites para el crecimiento de las plantas y actividad microbiana.
N, P, K extractable	• Disponibilidad de nutrimentos para las plantas y pérdida potencial de N, indicadores de productividad y calidad ambiental.
Capacidad de intercambio catiónico	• Almacén de nutrimentos para las plantas, retención de contaminantes y amortiguación del pH.
Indicadores biológicos	
Biomasa microbiana (C y N)	• Actividad biológica, flujo de nutrimentos, potencial catalizador microbiano y reposición de C y N.
N potencialmente mineralizable	• Productividad del suelo y aporte potencial de N.

Indicador	Relación con las funciones y condiciones del suelo
Respiración del suelo	• Medición de la actividad microbiana, cantidad de C en el suelo.
Riqueza y abundancia de fauna	• Relacionado con los procesos de descomposición y mineralización de residuos orgánicos y alerta temprana ante perturbaciones.
Indicadores de relieve	
Pendiente	• Condiciones permisivas para la presencia de la erosión.
Orientación del terreno	• Diferencias en parámetros estructurales (biomasa, distribución de frecuencias), y comportamiento hídrico del suelo.
Altitud	• Patrones de distribución de especies vegetales.
Unidad geomorfológica (posición del relieve)	• Forma del flujo del agua a lo largo de la ladera (zonas donadoras - zonas receptoras).

Fuente: Tomado de Karlen et al., 1997 y Nortcliff, 2002.

La calidad del suelo se estima a partir de sus propiedades, a partir de estas propiedades se puede realizar la evaluación de calidad, también conocida como evaluación edafocológica, estimando criterios de productividad tales como: capacidad de aporte de nutrientes, capacidad de retención de agua por horizonte, capacidad de aireación y capacidad de agua disponible. Otros criterios son:

- Criterios de calidad del ambiente biofísico: almacenamiento de carbono, capacidad de almacenamiento de agua, mantenimiento de la biodiversidad.
- Criterios de salud del suelo: capacidad de producir alimentos, capacidad de filtro-amortiguador para contener agentes contaminantes.

La valoración edafocológica del suelo se puede obtener a partir del procedimiento descrito en el *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo* (Siebe et al., 1996) o la utilización del *software* Assofu, (Gallegos et al., 2014), entre otros.

III. Evaluación del potencial de degradación del suelo frente a las actividades de la infraestructura vial

La naturaleza del suelo varía según el contexto, las características del suelo definen la estabilidad de otros elementos como el aire y el agua.

Una infraestructura vial siempre impactará en diferente grado varios tipos de suelos. Los procesos de degradación de los suelos en el área delimitada dependen de las características naturales de los mismos y las diferentes etapas de desarrollo de la obra, tales como:

- Preparación del sitio (movimiento de tierras), desmonte, despalme y desbroce de la vegetación, voladuras y perforaciones, rellenos, ocupación de fondos, dragados, tráfico de maquinaria, áreas de parques de maquinaria, etcétera.
- Ejecución de la infraestructura vial y generación de residuos.

Operación y mantenimiento de la infraestructura vial.

En cada etapa se debe identificar, cuantificar y valorar las alteraciones del conjunto de actividades de la infraestructura vial sobre los edafosistemas, así como conocer qué variables físicas, químicas y biológicas, así como qué procesos socioeconómicos, culturales y paisajísticos son afectados significativamente.

En el caso del impacto al suelo, todas las etapas de desarrollo de la infraestructura vial pueden tener efectos con diferente clasificación, en general, las principales afectaciones reconocidas son la pérdida del horizonte orgánico, compactación, sellamiento (cuando el suelo queda cubierto por concreto u otro material que lo inhabilite), erosión (hídrica o eólica), contaminación y pérdida total del suelo. Estos procesos de degradación del suelo impactan de manera directa a la vegetación, el hábitat de la vida silvestre, la recarga de los acuíferos y la calidad del agua; de manera indirecta modifican el paisaje y el clima.

Además de la valoración cualitativa antes señalada, es posible predecir la magnitud del impacto a partir de modelos conceptual-cualitativos desarrollados y soportados con modelos matemáticos que permitan estimar la incertidumbre asociada.

Por ejemplo, es la valoración cuantitativa de la erosión de suelo mediante el uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) (Wischmeier y Smith, 1978), la cual estima el volumen de suelo perdido en unidades de Ton/ha mediante la siguiente expresión:

$$A=R*K*LS*C*P$$

Donde:

A = pérdida de suelo (Ton/ha).

R = factor erosivo de la lluvia (MJ*mm/ha*h).

K = factor de erosionabilidad del suelo (ton*ha*h/MJ*mm*ha).

basadas en la textura, estructura, permeabilidad y materia orgánica del suelo.

LS=factor de longitud y grado de la pendiente (adimensional).

C = factor de cobertura y manejo.

P = factor de prácticas de cultivo.

La estimación de la erosión hídrica requiere de información temática como suelos, clima, pendiente y cobertura y uso del suelo.

Otro modelo que permite evaluar la pérdida de suelo y el impacto de calidad del agua es con el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tools), el cual permite predecir el efecto de las decisiones de gestión sobre el rendimiento de agua, sedimentos, nutrientes y plaguicidas con una precisión razonable en cuencas fluviales grandes y no explotadas.

En términos ecológicos, conocer las características del suelo permite la identificación de las funciones que éstos tienen en el ecosistema, de esta manera, se puede identificar las acciones en términos de Infraestructura Verde Vial que podrán ser implementadas para recuperar o fomentar los servicios ecosistémicos.

Ficha 4
CONSIDERACIONES Y ACCIONES PARA EL MANEJO
Y LA RESTAURACIÓN DE SUELOS

Fase de aplicación:

Planeación y construcción.

Precepto o requerimientos:

Las propuestas o alternativas de manejo de suelo en el área de construcción de la Infraestructura Verde Vial se llevarán a cabo en función de la evaluación del impacto, en donde se han empleado criterios como magnitud, significado, tipo, reversibilidad, riesgo y extensión o área de influencia.

Debido a que no es posible realizar una propuesta genérica sobre las alternativas de manejo de suelo debido a la gran heterogeneidad existente en la distribución de los suelos. Sin embargo, se proponen recomendaciones generales de acuerdo con la etapa de desarrollo de la infraestructura vial o el tipo de impacto.

Criterios metodológicos:

Las propuestas metodológicas para el manejo de la infraestructura vial pueden abordarse a partir de tres criterios: 1) por escala de trabajo, 2) por procesos de degradación del suelo y 3) por etapas de construcción. A continuación se establecen de manera general algunas actividades que permiten manejar el suelo en una Infraestructura Verde Vial para su conservación.

I. Por escala de trabajo.

A nivel regional, los procesos que determinan la vulnerabilidad del suelo a la degradación son principalmente el tipo de suelo y sus propiedades intrínsecas. En este sentido, es importante conocer las unidades de suelo dominantes y su vulnerabilidad a la degradación.

Otro aspecto para considerar a esta escala, además del tipo de suelo, es el factor topográfico y climático. La pendiente del terreno es relevante, ya que a medida que ésta aumenta, es necesario aumentar la construcción de obras de regulación de la erosión. Asimismo, a medida que aumenta la precipitación se requieren mayor número de obras de control de erosión hídrica.

II. Por procesos de degradación del suelo.

Otra forma de abordar los problemas de impacto sobre el suelo a partir del conocimiento de los procesos de degradación es conociendo los factores que lo favorecen, entendiendo cuáles de estos factores son susceptibles a manejo durante la obra de Infraestructura Verde Vial. De esta manera, es posible plantear una serie de actividades, propuestas y tipos de obras usadas a diferente escala. La Tabla 2.5. propone estos criterios generales.

Tabla 2.5
Criterios para generar propuestas de manejo de suelos
para la construcción de Infraestructura Verde Vial

Proceso de degradación	Factores que controlan el proceso	Acciones del medio susceptibles a manejar	Actividades	Infraestructuras verdes para la sostenibilidad
Erosión	<p>Intensidad de la lluvia.</p> <p>Propiedades de suelo (textura, materia orgánica).</p> <p>Pendiente del terreno.</p> <p>Cubierta vegetal.</p> <p>Manejo del suelo.</p>	<p>Conservación o restauración de la materia orgánica del suelo.</p> <p>Suavizar pendientes en los cortes y terraplenes.</p> <p>Manejo de la cubierta vegetal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Recoger la capa fértil del suelo y almacenar para futura recuperación. Promover la composta de los desechos orgánicos. Cubrir los taludes con suelo fértil de despalme. En zonas con problemas de estabilidad estructural, asegurar y estabilizar los cortes de terreno Promover la revegetación en superficies expuestas. 	<ul style="list-style-type: none"> Construcción de terrazas con material reciclado de la infraestructura vial y su revegetación. Construcción de contrafuertes, muros de retención, gaviones. Restauración de suelos con vegetación nativa, utilizando el material reciclado de la infraestructura vial (composta) y su revegetación. Construcción de macetas y cunetas filtrantes. Construcción de suelos artificiales para la revegetación, construcción de jardines de lluvias. Construcción de humedales artificiales, cunetas verdes con césped en los costados de la carretera, puentes verdes, y otras acciones que controlan el escurrimiento, favorecen la infiltración y aumentan el contenido de materia orgánica. Revestimiento de talud, colocando una capa filtrante (geotextil o geomembranas orgánicas).

Proceso de degradación	Factores que controlan el proceso	Acciones del medio susceptibles a manejar	Actividades	Infraestructuras verdes para la sostenibilidad
Compactación	Uso de maquinaria pesada que modifica la estructura del suelo y otras propiedades.	Conservación y restauración del suelo.	<ul style="list-style-type: none"> Recuperación del horizonte orgánico. Restauración de zonas compactadas. Delimitar las áreas de tránsito de maquinaria pesada. 	<ul style="list-style-type: none"> Restauración de suelos con vegetación nativa, utilizando el material reciclado de la infraestructura vial (composta).
Contaminación	Cantidad y tipo de contaminantes. Tipo de suelo (textura y Materia orgánica). Topografía del área. Clima.	Manejo de los contaminantes. Manejo del suelo. Manejo de las actividades de la infraestructura vial.	<ul style="list-style-type: none"> Definir bancos de tiro de material contaminado. Alejar disposición de material de desecho de ríos y lagos o cualquier cuerpo de agua. Evitar la disposición de residuos sobre el suelo. Favorecer el aumento de materia orgánica del suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> Establecer presas de decantación para atrapar sedimentos contaminados. Construir humedales artificiales que favorezcan la retención de los contaminantes. Construcción de jardines con vegetación hiper acumuladora de contaminantes (cuando sea posible). Construcción de suelos artificiales que favorezcan la retención de contaminante (mayor contenido de arcillas).
Cambio de uso de suelo y pérdidas de vegetación	Erosión Tipo de vegetación	Manejo del suelo. Conservación de la vegetación.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar labores de restauración y paisajismo. Manejo de la erosión. 	<ul style="list-style-type: none"> Construcción de terrazas con material reciclado de la infraestructura vial. Construcción de contrafuertes, muros de retención, gaviones. Restauración de suelos con vegetación nativa, utilizando el material reciclado de la infraestructura vial (composta).

Proceso de degradación	Factores que controlan el proceso	Acciones del medio susceptibles a manejar	Actividades	Infraestructuras verdes para la sostenibilidad
				<ul style="list-style-type: none"> Construcción de cunetas filtrantes. Construcción de suelos artificiales para la revegetación, construcción de jardines de lluvias, humedales artificiales, cunetas verdes con césped en los costados de la carretera, puentes verdes, y otras acciones que controlan el escurrimiento, favorecen la infiltración y aumentan el contenido de materia orgánica.

III. Recomendaciones por etapas de construcción.

- Preparación de sitio (movimiento de tierras).

En las actividades de desmonte, despalme y desbroce de la vegetación se debe recuperar la biomasa vegetal para reusar como material genético en la restauración de las áreas a revegetar.

Tener un programa de manejo de residuos de desmonte como estrategia de reciclaje de biomasa a través del composteo para las actividades de restauración o rehabilitación de suelos.

Se debe recuperar el horizonte orgánico en la actividad de despalme, como una forma de recuperar la materia orgánica del suelo, ya que este material representa el carbono más estable del suelo y permite favorecer los procesos de captura de carbono y regulación del clima.

Recuperar todo el material de excavación de las áreas impactadas para reutilizarlo en la elaboración de suelos artificiales y de esta manera restaurar zonas erosionadas o sitios despojados de suelo.

Reducir al máximo la zona de parques de maquinaria para reducir los procesos de compactación del suelo.

Construcción de obras de drenaje que permitan reducir los procesos de erosión laminar y disminuyan la formación de cárcavas profundas.

Aprovechamiento de los bancos de préstamo como material reciclable para la elaboración de suelos artificiales.

Establecer la recuperación de los sitios usados como bancos de tiro utilizando suelos artificiales como estrategia de restauración del suelo y de la vegetación.

- Ejecución de la obra.

Contar con programa de manejo de desechos y descargas (generación de sólidos en suspensión y sedimentación de partículas).

Durante la ejecución de la obra es necesario desarrollar actividades de control de derrumbes, tales como construcción de taludes, terrazas o diques que contengan el movimiento de sedimentos y disminuyan la pérdida de suelo superficial y la sedimentación de partículas, y así evitar el impacto de ecosistemas vecinos.

- Operación y mantenimiento de la obra.

Construir infraestructura verde a lo largo de la infraestructura vial para disminuir la pérdida de suelo por erosión y escurrimientos superficiales. Se recomiendan estructuras tales como jardines de lluvia, macetas de infiltración, humedales y corredores arbolados.

Recuperar suelos degradados en el trazo de la obra para favorecer la vegetación, los hábitats de animales y aumento en la conectividad.

Rehabilitar zonas despojadas de suelo, utilizando los materiales reciclados de la obra, como la composta, los bancos de material de excavación y de esta manera tener la capacidad de construir suelos artificiales que permitan recuperar los servicios ecológicos del suelo, tales como recuperación de la vegetación, aumentar la conectividad, favorecer la capacidad de infiltración y favorecer la captura de carbono y regulación del clima.

FICHA 5 EVALUACIÓN DEL SISTEMA HIDROLÓGICO

Fase de aplicación:

Planeación.

Precepto o requerimientos:

Para realizar el diseño de Infraestructura Verde Vial, es conveniente contar con la recopilación de estudios existentes (geología, geofísica, geohidrología y geotecnia, entre otros) que permitan conocer las condiciones y características del tipo de terreno y el subsuelo en la zona de interés. Asimismo, podrá ser útil para formular una propuesta de diseño con cantidades de volumen de agua aproximadas, cercanas a las necesidades específicas. La información existente es de gran utilidad, pues aporta características técnicas de la zona de interés y facilita su comprensión.

Es necesario incorporar en esta etapa la delimitación del área de influencia, debido a que a pesar de que se trate de un estudio en lo general, la extensión e influencia longitudinal del proyecto (aguas arriba y aguas abajo y no sólo en el trazo de la infraestructura vial) puede justificar un análisis más detallado de las unidades ambientales y socioeconómicas implicadas, el concepto de cuenca facilita la obtención y comprensión del área. De la correcta delimitación de estas unidades dependerá el diagnóstico para evaluar las condiciones del sistema hidrológico.

Criterios metodológicos:

En los últimos años, y gracias a los avances en la rama de la computación, existe una creciente demanda de almacenamiento informático, además del requerimiento de análisis complejos y despliegue de información de datos espaciales, esto ha motivado la creación de sofisticados sistemas de información y bases de datos. Es por ello que muchas dependencias y organismos autónomos han concentrado su información en bases de datos electrónicas y sistemas de información geográfica abiertos y que es posible consultar y en muchos casos descargar para su manipulación.

En el caso de información hidrológica existen muchas variables e información relevante que se puede explorar y descargar para los cálculos necesarios en la etapa de diseño. En la Tabla 2.6. se sintetiza el tipo de información y la fuente de cada una.

Si bien esta información puede ser consultada para el análisis, es importante considerar la información a generarse por parte de la misma infraestructura vial, en términos de hidrología y geotecnia, ya que dará mayor certeza sobre el comportamiento de este elemento.

Tabla 2.6 Información necesaria para evaluar el sistema hidrológico y las fuentes de obtención del recurso.

Tipo de información	Relevancia en evaluación hidrológica	Fuente
Datos meteorológicos	Las variables meteorológicas más habituales son la temperatura (máxima, media y mínima), la humedad relativa (máxima, media y mínima), la velocidad del viento y su dirección, la radiación solar y la precipitación. Para la planeación y diseño de infraestructura verde es vital conocer estas variables con especial énfasis en los volúmenes de precipitación, que se traducirán en volúmenes de escorrentía que son la base para el diseño de la infraestructura verde en materia de agua.	"Servicio Meteorológico Nacional. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Red de Observatorios Climatológicos. Otras entidades propietarias de redes meteorológicas (p. ej. El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE). Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS). Algunas páginas que pueden ser consultadas son las siguientes: Global Weather Data. https://globalweather.tamu.edu/ https://swat.tamu.edu/media/116587/swat_us_ssurgo_soils_withstatsgo_20200723.zip https://smn.conagua.gob.mx/es/asalleón/asalleón-climatologica/asalleón-estadistica-climatologica http://www.conabio.gob.mx/ https://app.conagua.gob.mx/bandas/Soil Data
SIG sobre geología, relieve, topografía e hidrografía	En los SIG podemos manipular y analizar información referente a la variabilidad superficial geológica, relieve e hidrológica con mayor facilidad de manera gráfica Su análisis nos ayudará a obtener valores detallados de la zona de estudio que puedan obtenerse como resultado de datos de los continuos de elevación mexicano (CEM) y realizar cálculos más especializados para el cálculo de avenidas y escurrimientos. Además, permitirá ubicar los cuerpos de agua presentes en la zona de estudio.	INEGI. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). INEGI. Hidrografía y Geología. Servicio Geológico Mexicano. Páginas como: https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/ https://www.gob.mx/asalle/acciones-y-programas/consulta-la-base-de-datos-del-repda https://app.conagua.gob.mx/sistemasdeagua/ http://sina.conagua.gob.mx/

Tipo de información	Relevancia en evaluación hidrológica	Fuente
Áreas hidrológicas administrativas	Las regiones hidrológicas están conformadas en función de sus características morfológicas, orográficas e hidrológicas. En ellas, se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos. Su conocimiento es importante para la consulta de las concesiones, disponibilidad del recurso y delimitación del área de estudio.	Secretaría del Medio Ambiente y de Recursos Naturales. Páginas como: http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/agua.html#:~:text=Las%20Regiones%20hidrol%C3%B3gicas%20est%C3%A1n%20conformadas%20por%20los%20recursos%20h%C3%ADricos.
Información socioeconómica	Para realizar planeación de mediano y largo plazos es necesario conocer el estado actual de las condiciones socioeconómicas de la región, y realizar pronósticos y escenarios sobre la modificación de éstos debido a que impactan directamente al uso actual y futuro de la disponibilidad del agua.	INEGI Económica, Censos de Población y Vivienda. CONAPO.
Usos y volúmenes concesionados de agua superficial y subterránea	Muchos de los volúmenes de afluentes y cuerpos de agua, así como agua subterránea se encuentran bajo el título de alguna concesión; por lo que es necesario conocer los volúmenes concesionados previo al diseño de alguna infraestructura que modifique, interfiera o disminuya el fin de cada flujo.	Comisión Nacional del Agua. Páginas como: https://www.gob.mx/asalle/acciones-y-programas/consulta-la-base-de-datos-del-repda https://app.conagua.gob.mx/sistemasdeagua/

Ficha 6 EVALUACIÓN DEL RECURSO ENERGÉTICO

Fase de aplicación:

Planeación.

Precepto o requerimientos:

La evaluación del recurso energético para la planeación de la Infraestructura Verde Vial es muy importante para establecer si el autoabastecimiento es posible o si se requiere de otra fuente de generación externa a la infraestructura vial.

Conocer el recurso en la fase de planeación, permite definir los sitios con potencial de generación de energía solar o eólica. Se debe recabar información climática y del potencial de recursos renovables en las zonas cercanas a donde se pretende desarrollar la Infraestructura Verde Vial. Debe buscarse información de sitios donde realicen diferentes medios, ya sean mediciones directas o estimaciones, es importante considerar que en el sitio se pueden tener condiciones muy particulares de clima y del recurso (p. ej. Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias [INEEL]).

En el caso de la energía solar se deben consultar mapas del potencial solar, en el caso de la energía eólica se pueden consultar mapas de potencial eólico elaborados o presentados por dependencias gubernamentales, privadas o académicas que se encuentren reportadas para la zona e incluso de otros países, y al igual que para la solar, se tomarán también datos *in situ* para complementar.

Criterios metodológicos:

Se recomienda realizar la visita de campo al sitio de emplazamiento de la infraestructura posterior al análisis de gabinete. Esta visita deberá centrarse en las zonas donde el análisis de sistemas de información geográfica identificó las aéreas de potencial con energías renovables. El objetivo de esta visita es: i) validar el análisis elaborado en gabinete, y ii) complementar la información con elementos de relevancia que no hayan sido posibles de identificar desde el gabinete dada la resolución de la información, pero que son de relevancia para incorporar en el estudio.

Será de gran valor realizar mediciones del recurso solar y eólico *in situ* en las regiones que han sido identificadas con potencial, para validar la información recabada sobre el potencial del recurso.

Para la toma de datos se recomienda la instalación de puntos de medición utilizando piranómetros y anemómetros en las zonas donde se ha identificado potencial solar y eólico, respectivamente.

I. Un estudio para la energía eólica puede ser efectuado como sigue.

- Toma de medidas: en sitio, para determinar el potencial eólico, realizando medidas en periodos de un año. Estas mediciones se efectúan poniendo

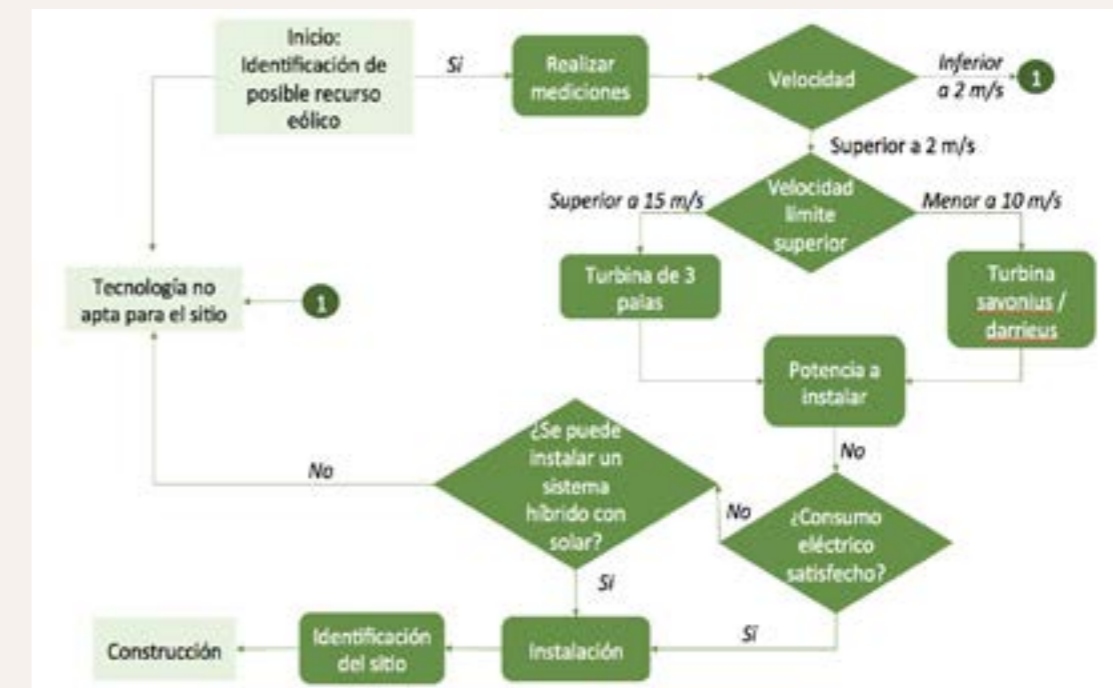
una torre con captadores que registran los vientos a diferentes alturas. Estos valores obtenidos posteriormente son analizados y cotejados con los datos de 10 años de una estación climatológica. El rango de error de las medidas obtenidas no debe superar el 10 %, pero su costo es elevado por la puesta de una torre de mediciones y el tratamiento de los datos obtenidos.

- Modelado: hoy en día, existen programas de cálculo que permiten llevar a cabo la modelización de los vientos con base en la localización geográfica, altura de torre y obstáculos colindantes. Su fiabilidad es menor a la toma de datos en sitio (30% de error), pero su costo es mínimo.
- Mapas de vientos: este método no se recomienda, ya que ofrece una visión general de la zona, pero no tiene en cuenta obstáculos y alturas. Puede dar una visión general del potencial, pero no puede ser usado para una previsión de producción.

Una vez realizado el estudio, se procede a analizar con detalle el tipo de equipo a instalar considerando tanto las características del viento como las del terreno. Hay que tener en cuenta que el rendimiento de las turbinas es diferente según la naturaleza del viento, y en algunos casos las eólicas pierden una gran parte de su eficacia en caso de presentarse turbulencias.

El siguiente esquema muestra una ruta de decisión para la implementación de la energía eólica.

Figura 2.5
Esquema de decisión para Infraestructura Verde Vial basada en energía eólica.



II. Un estudio para la energía solar puede ser efectuado como sigue:

La Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional administra la red de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), pertenecientes a la Comisión Nacional del Agua. Estas estaciones se han venido instalando a partir de 1990, hoy en día hay 189 EMAS y 87 ESMAS distribuidas por el territorio nacional. Una Estación Meteorológica Automática está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas. Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas variables meteorológicas (dirección del viento, dirección del viento de ráfaga, velocidad del viento, velocidad del viento de ráfaga, temperatura ambiente promedio, humedad relativa, presión atmosférica, precipitación, radiación global).

Adicionalmente, a partir del uso de sistemas de información geográfica, se puede modelar la radiación solar. Esto, basado en las extensiones con las que cuentan estos sistemas y están basadas en largas colecciones de bases de datos de investigaciones de la NASA, YERC, Solargis, INEL (Inventario Nacional de Energías Limpias), y ESRI. Es entonces que con el uso del Modelo Digital de Elevación (MDE) a 30 m de resolución espacial y considerando factores espaciales y temporales relacionados con las condiciones atmosféricas, la latitud del sitio, la elevación, la pendiente y el aspecto, los cambios diarios y estacionales se pueden identificar estas zonas (ver Figura 2.6) (The World Bank, 2020).

Figura 2.6
Mapa de irradiación solar de México.



Fuente: Tomado de <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexicoungloboterraqueo>

El siguiente esquema muestra una ruta de decisión para la implementación de la energía fotovoltaica.

Figura 2.7
Esquema de decisión para las instalaciones de Infraestructura Verde Vial basada en energía fotovoltaica.



Ficha 7 CONSIDERACIONES Y ACCIONES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PARA EL USO DE INFRAESTRUCTURA VERDE CON ENERGÍA RENOVABLE

Fase de aplicación:

Planeación.

Precepto o requerimientos:

En esta parte del proceso, resalta la importancia de una buena comunicación con todos los actores involucrados en la planificación de la Infraestructura Verde Vial, para contar con información sobre los diferentes componentes del proyecto que requieran de energía para su operación, y que de este modo se analice toda la información para tomar decisiones que permitan alcanzar la mejor solución con respecto a las necesidades del proyecto.

Es necesario identificar los componentes de la infraestructura vial a instalar, que por las características de su operación requiera del suministro de energía eléctrica y que tengan relación con otros elementos de la infraestructura, con el objeto de realizar una planeación conjunta.

Todos los componentes que requieran del suministro de energía eléctrica deben ser identificados espacialmente, conocer el tipo de equipo del que se trata y relacionarse con un consumo de energía eléctrica. Lo anterior es para poder dimensionar cuál será la fuente de energía renovable que podría ser empleada para abastecer la demanda de energía. Por ejemplo, las zonas de peaje, las zonas de servicios, la señalización, la iluminación, entre otros, son componentes que requieren de energía eléctrica y que podrían ser abastecidos con estructuras de generación de energía renovable.

Se deben conocer todos los equipos que serán instalados en la Infraestructura Verde Vial, con el objeto de conocer el tipo de energía requerida y la potencia a ser abastecida, adicionalmente, debe conocerse la importancia que el equipo tiene en la operación de la Infraestructura Verde Vial, por ejemplo, si su operación es vital o no impacta de forma considerable en la operación de la Infraestructura Verde Vial. Esto, con el objeto de identificar las instalaciones eléctricas que requieren de un respaldo en caso de alguna falla. Por ejemplo, las bombas de agua en pasos deprimidos o la iluminación en túneles.

También es necesario conocer el tipo de flora y fauna de la zona, ya que éstas pueden interrumpir el buen funcionamiento de las instalaciones de generación o en sentido contrario, pueden resultar afectadas por la generación eléctrica. Por ejemplo, cierto tipo de vegetación puede producir sombras que afecten el funcionamiento de los paneles solares y en el caso contrario, las aves pueden resultar afectadas por el funcionamiento de turbinas eólicas.

En este sentido, es necesario hacer un intercambio de información para identificar lugares en los que se requiera el consumo de energía eléctrica y la presencia de elementos de infraestructura verde para evaluar la posibilidad de que no exista un conflicto al instalar los generadores solares o eólicos. Existe la posibilidad de que se pueda hacer un trabajo conjunto para la optimización de recursos humanos y materiales.

Deberá realizarse un análisis de concordancia de atributos para identificar las fuentes de energía renovable más adecuadas al sitio donde serán implementadas. Dicho análisis permite la evaluación de las respuestas de los evaluadores, cuando se analizan características de calidad tipo atributo, donde la subjetividad puede afectar la efectividad del sistema de medición.

Lo anterior debido a que existe una serie de atributos observables directa o indirectamente que determinan la calidad del proyecto, dando la medida de estos atributos un valor de estimación, tales como la usabilidad, funcionalidad, fiabilidad, eficiencia, mantenibilidad y operabilidad.

Una vez que se tengan identificadas las áreas, es necesario definir los equipos para conocer sus consumos y las horas de operación, para determinar la carga y proporcionar la información para el diseño de los sistemas de generación con energías renovables.

Es importante hacer un cruce de información entre las necesidades energéticas y las fuentes de energía solar y eólica disponibles en el sitio. Asimismo, se deberá de promover el uso de equipos que cuenten con certificaciones de eficiencia energética.

Criterios metodológicos:

En el proceso de planeación se presentará la oportunidad de ir confirmando la información recabada e ir identificando las regiones o sitios con mejor potencial solar y eólico, información que puede ser reforzada por los testimonios de las personas originarias de dichos sitios.

En algunos sitios se podrá disponer de ambos recursos, por lo que se pueden integrar sistemas de generación solar-eólico. Debido tanto a que la energía solar como la energía eólica tienen periodos de máxima generación y periodos de reposo, su generación no es constante. La ventaja de los sistemas híbridos es que al combinar dos fuentes se puede llegar a una generación continua, ya que se pudiera generar en el día con energía solar y por las noches con la energía eólica, aunque esto puede no ocurrir.

En el caso particular de las carreteras, se tienen servicios que requieren el suministro de energía eléctrica y con ello la instalación de largas líneas de distribución de energía para su suministro, las cuales pueden ser suministradas localmente por energías renovables evitando la instalación de las líneas de transmisión y distribución, así como los impactos ambientales asociados a éstas.

En las plazas de cobro y paradores se presenta la posibilidad de instalar paneles solares en sus techos, así como en las áreas de servicios, y en los estacionamientos. En algunos de estos sitios se pueden instalar generadores eólicos. Todo esto con los estudios previos del recurso que se encuentre disponible en el sitio.

En el caso de líneas que utilicen sistemas eléctricos se abre la posibilidad de la instalación de granjas solares o eólicas para alimentar la energía requerida para la operación de dicho sistema, esto se podrá realizar de forma integrada a la obra de la vía o de forma separada.

Se recomienda realizar la visita de campo posterior al análisis de gabinete. Esta visita deberá centrarse en las zonas donde el análisis del sistema de información geográfica identificó las áreas de potencial con energías renovables. El objetivo de esta visita es: i) validar el análisis elaborado en gabinete, y ii) complementar la información con elementos de relevancia que no hayan sido identificados desde el gabinete, dada la resolución de la información, pero que son de relevancia para incorporar en el estudio.

Será de gran valor realizar mediciones del recurso solar y eólico en sitio de las regiones que han sido identificadas con potencial para validar la información recabada sobre el potencial del recurso.

Para la recopilación se recomienda la instalación de puntos de medición utilizando piranómetros y anemómetros en las zonas donde se ha identificado potencial solar y eólico, respectivamente.

I. Fases para la implementación de un sistema de energía solar

a) Primera fase.

Se realiza un trabajo de campo donde se recolecta toda la información necesaria referente a los consumos energéticos totales del proyecto y los lugares en que dicha energía es requerida. Asimismo, se debe tomar en cuenta características del lugar, el área requerida en donde inicialmente se determina la instalación de los paneles solares (esto también aplica para los generadores eólicos). Para conocer el recurso renovable en el sitio se pueden utilizar programas o fuentes de información como pueden ser los mapas publicados por la Secretaría de Energía o por la NASA.

Teniendo en cuenta lo anterior, se establecen criterios como la localización de los sitios, el tamaño requerido donde se requiere la generación de energía y una descripción general de los pequeños proyectos a lo largo de la vía de comunicación.

b) Segunda fase.

Los datos recolectados se utilizan para determinar el número de paneles que van a ser requeridos tomando en cuenta la siguiente metodología:

- Determinación de horas pico de radiación (HSP).
- Potencia requerida por el usuario.
- Determinación de la potencia a instalar.
- Factor de rendimiento.
- Número de paneles requeridos para suplir la demanda de energía.
- Configuración del campo solar.
- Dimensionamiento del banco de baterías.

El mayor consumo de energía eléctrica para la señalización se da en las horas de la noche, debido que este es el momento donde se encienden los señalamientos o la iluminación, debido a que no hay presencia de luz natural. Por tanto, es necesario instalar un sistema de almacenamiento de energía, también llamados bancos de baterías.

c) Tercera fase.

En esta última fase se realiza la simulación de la operación y de la energía generada, el estudio del monto de la inversión requerida, el financiamiento que

conlleva el proyecto de generación, así como la recuperación de la inversión consecuencia de los ahorros energéticos. Adicionalmente se pueden evaluar los servicios ambientales considerando de las emisiones de GEI evitadas al ambiente.

II. Fases por seguir para la instalación de un sistema eólico.

- Elección del lugar y evaluación de los parámetros útiles (p. ej. estudio de la velocidad del viento).
- Análisis de las autorizaciones necesarias.
- Estudio de viabilidad de la instalación y verificación de los costos.
- Elección del proyectista y constructor y fase de implementación.
- Gestión de la instalación (mantenimiento y gestión).

La inversión requerida para la instalación de una eólica disminuye cuanto más elevada es la potencia de ésta. Además, el rendimiento de producción es proporcional al tamaño de la eólica. Estos dos aspectos favorecen sin ningún lugar a dudas la implantación de eólicas de gran tamaño.

Las instalaciones eólicas de pequeña potencia presentan unas características propias, que las dotan de una serie de ventajas adicionales respecto a la gran eólica, como una potencial mayor eficiencia global por las pérdidas evitadas en las redes de transporte y distribución, y que permiten la integración de generación renovable sin necesidad de crear nuevas infraestructuras eléctricas. Además, pueden fomentar la implicación ciudadana en la mejora de la eficiencia energética, el autoabastecimiento energético y la lucha contra el Cambio Climático.

III. Evaluación de los diferentes proyectos individuales.

Cada componente de la infraestructura vial que requiera el suministro de energía eléctrica deberá ser visto como un proyecto individual al cual hay que suministrarle energía de forma independiente. En algunos casos se pueden agrupar en un centro de carga que puede ser abastecido con una sola fuente de generación.

Una vez que se cuenta con la información sobre los sitios, equipos, consumo de energía eléctrica y el recurso solar y eólico disponible, se debe elegir el tipo de generación de energía renovable a utilizar. Se requiere hacer un cruce de información entre las necesidades energéticas y las fuentes de energía solar y eólica disponibles en el sitio. Es importante contar con información del terreno en el que van a ser instalados los conjuntos.

Se debe seleccionar el elemento más abundante, si existieran los dos recursos se puede optar por un sistema híbrido, dependiendo de la demanda de energía se debe proyectar el tamaño de la instalación y el número de paneles o aerogeneradores necesarios para cubrir la demanda y estimar el banco de baterías, ya que en su mayoría son sistemas aislados sin conexión a la red eléctrica.

Evaluar la posibilidad de conexión a la red eléctrica en caso de no poder contar con recursos renovables y que exista una red eléctrica cercana.

Ficha 8
CONSIDERACIONES SOCIALES Y DE GOBERNANZA

Fase de aplicación:

Planeación.

Precepto o requerimientos:

Bases de datos espaciales en el campo de lo social, programas de desarrollo social, talleres participativos para la exposición, discusión y toma de decisiones de las comunidades respecto al proyecto de Infraestructura Verde Vial.

Criterios metodológicos:

Las poblaciones dentro del territorio mexicano, en general, constituyen la primera fuente de información, ya que éstas al conformar el espacio, mantienen una interacción constante con el entorno que se habita, así como en muchos casos (por ejemplo, algunos grupos indígenas) han legado conocimiento de años de tradición y uso del espacio. En este sentido, incluso muchas comunidades aún mantienen un importante vínculo y comprensión del funcionamiento del sistema, y cuando este conocimiento se ejerce, ayuda a mantener un uso racional, diversificado y saludable, permite aprovechar al máximo la variedad de servicios que cada ecosistema ofrece, mantiene la diversidad, evita o previene aprovechamientos peligrosos que pueden desencadenar en desastres ambientales y permite seguir conociendo las bondades aún no descubiertas del mismo (Boege, 2008a; Boege, 2008b; Boege, 2009; WHO, 2005).

Considerando la relevancia que tiene la apropiación del territorio por parte de la población local y sus representantes, resulta imperante conocer las condiciones en las que ocupan el espacio y satisfacen sus necesidades básicas sobre el mismo (incluso las culturales). Es importante entonces incluirlas en los procesos de participación y planeación como parte de una estrategia para generar identidad y con ello promover el buen manejo, conservación y uso del territorio.

Para este proceso se recomienda que desde esta etapa de planeación se inicien los acercamientos, con los distintos actores locales en un diálogo de participación que contribuya a facilitar la gestión favoreciendo los intereses de las partes desde un diálogo de saberes.¹⁰ Esta propuesta requiere un cambio de paradigmas en la forma en la que se planifican los proyectos en la actualidad, pero resulta imperante para los proyectos en términos de sustentabilidad.

¹⁰ El diálogo de saberes es un método cualitativo que busca comprender, sintetizar, teorizar y contextualizar el conocimiento; permite entender los problemas y necesidades que tiene la población, mediante la reflexión y discusión de los actores, basándose en las palabras de la misma población.

Para plantear estas estrategias es necesario contar con la participación de un especialista en lo social.

Como parte de las consideraciones mínimas y generales en la planificación social, se mencionan las siguientes:

I. Considerar el régimen de la propiedad actual de los predios a requerirse para la ejecución de los trabajos de Infraestructura Verde Vial.

Resulta importante determinar la conveniencia de la Infraestructura Verde Vial desde estos aspectos y que ésta sea factible desde el punto de vista técnico y social (el aspecto social puede ser fundamental para que se pueda o no realizar). Se recomienda tomar en cuenta:

- Trámites y gestiones para los predios, según sea el caso (ocupación temporal, renta o adquisición), con sus respectivos costos.
- Investigación para detectar posibles conflictos sociales que puedan obstaculizar o incidir en la ejecución del proyecto.
- Indagar sobre las principales organizaciones sociales, sindicales, laborales o cualquier otra que pudiese tener relación con el agua, el suelo o cualquier otro Servicio Ecosistémico y sus diferentes usos.
- Identificar el uso que se le da al recurso de manera local (ganadería, agricultura, consumo humano, etc.) para no generar conflictos con cada uno de los actores de la cadena de aprovechamiento.
- Identificar la infraestructura existente que pueda resultar afectada o beneficiada por la ejecución del proyecto: ductos, gasoductos, líneas de fibra óptica, y en general todas aquellas que se requiera cruzar u ocupar por los trabajos que involucren los estudios o proyectos de Infraestructura Verde Vial.

II. Mapeo de Actores.

Toda infraestructura vial que modifique, intervenga y/o altere los volúmenes de agua, suelo, bienes forestales y ecosistémicos en general, dentro de un sistema o sitio específico no se puede emprender unipartidariamente. Se requiere de una colaboración cercana con diferentes grupos o actores de interés en cada sitio y extenderse a áreas aguas arriba y áreas aguas abajo mediante arreglos institucionales y de gobernanza que sean incluyentes y eficaces.

Un actor es toda unidad o individuo que forma parte de un grupo, organización, entidad, corporativo o institución del sector público, social, privado organización no gubernamental o agencia internacional que tenga relación directa con el proyecto a ejecutar (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2016).

Los actores clave son aquellos individuos cuya participación es indispensable y obligada para el logro del propósito, objetivos y metas del proyecto en cuestión. Tienen el poder, la capacidad y los medios para decidir e influir en

campos vitales que permitan o no el desarrollo del proyecto. En algunos casos, pueden manifestar un interés directo, explícito y comprometido con los objetivos y propósitos de éste. Algunas de las características que presentan los actores clave son:

- Forman parte de la sociedad asentada en el área de implantación del proyecto y representan intereses legítimos del grupo.
- Tienen funciones y atribuciones en relación directa con los objetivos del proyecto.
- Disponen de capacidades, habilidades, conocimiento, infraestructura y recursos para proponer, atender y solventar problemas científico-técnicos.
- Cuentan con mecanismos de financiamiento o donación de recursos.
- Tienen capacidad de gestión y negociación con los diversos agentes y/o niveles gubernamentales que permiten construir consensos y acuerdos.

Entre los actores clave, es importante considerar a los siguientes:

- Actores económicos (empresarios, comerciantes, agroempresarios, etcétera).
- Actores socioculturales (sacerdote, maestro, cronista del pueblo, médico, vecinos en general, entre otros).
- Actores político-institucionales (delegado ejidal o comunal, delegado, presidente municipal, líderes políticos, etcétera).
- Actores internacionales (presidente de una ONG internacional, Cruz Roja, Banco Mundial, Unicef, ambientalistas, etcétera).

III. Identificación de instituciones clave.

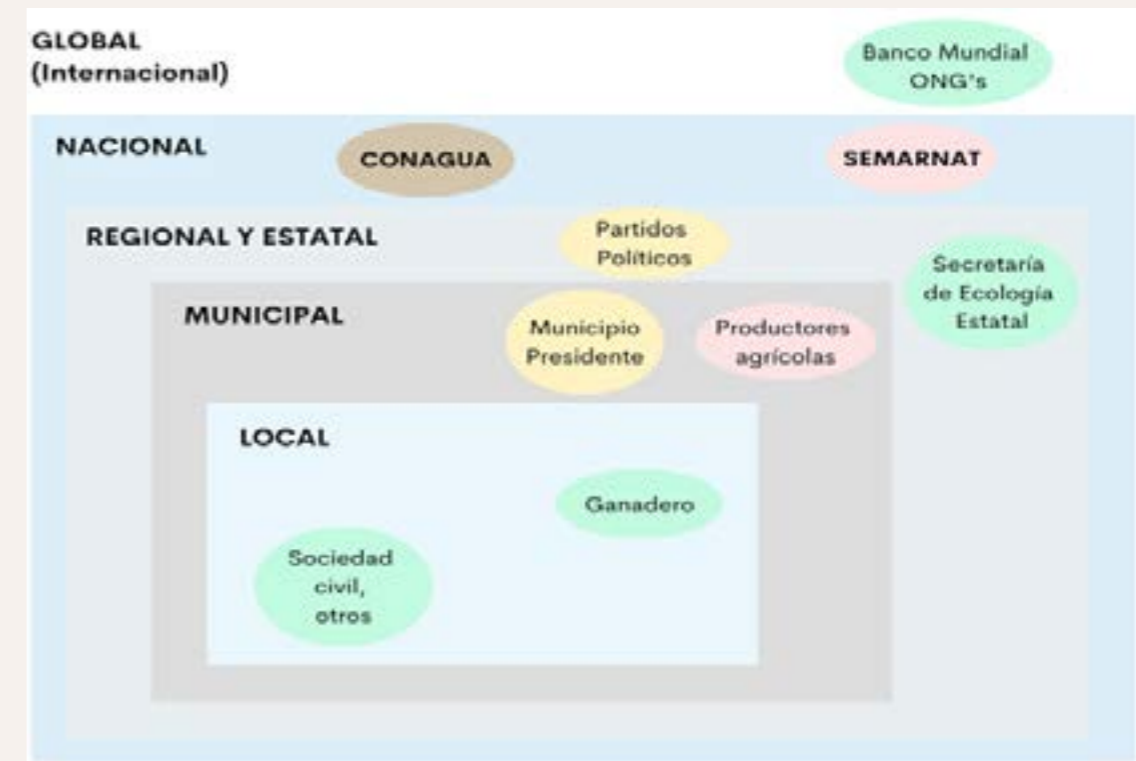
En el caso de México, se tienen varias instituciones clave y dependencias reguladoras del territorio como son la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), entre otros.

En el caso del agua, por ejemplo, la estructura orgánica es la CONAGUA y de manera regional los Organismos de Cuenca son los responsables de administrar y preservar las aguas nacionales en cada una de las trece regiones hidrológico-administrativas en que se ha dividido el país, las cuales son instancias de coordinación y concertación, apoyo, consulta y asesoría entre la autoridad (CONAGUA) y los diferentes usuarios del agua en el país, en los cuales convergen los tres órdenes de gobierno, los usuarios particulares y las organizaciones de la sociedad de la respectiva cuenca hidrológica.

Posteriormente a nivel estatal se encuentran las direcciones locales, éstas tienen la importante labor de aplicar las políticas, estrategias, programas y acciones de la Comisión en las entidades federativas que les corresponden.

Finalmente las instancias locales, que son las unidades con las que se colaborará directamente, y abarcan a los delegados ejidales o comunales, presidencia municipal y organizaciones políticas locales o cualquier grupo que intervenga en la cadena del uso y aprovechamiento del agua. En la Figura 2.8 se presenta un pequeño esquema de identificación y asociación de actores clave a manera de ejemplo para el caso de la gestión del agua (CONAGUA, s.f.).

Figura 2.8
Esquema de la identificación y asociación de actores clave.



Fuente: Modificado de CONAGUA, s.f.

El esquema anterior ejemplifica la gestión del agua, pero dependiendo del contexto local y del proyecto se deben buscar las instancias correspondientes.

IV. Calidad de vida de la población.

El bienestar social es otra variable que se encuentra ligada al uso del espacio, en este caso presenta un vínculo con su índice de marginación. Éste se puede usar como una variable que infiere sobre el bienestar social si se considera que está vinculado con el acceso a servicios básicos y a los relacionados con la salud ambiental (Corvalán *et al.*, 2005). La falta de servicios públicos como el agua, sanitarios, drenaje y educación pueden llegar a causar serios problemas de salud ambiental, por ejemplo, la descarga de residuos urbanos al suelo y al agua pueden sobrepasar la capacidad de resiliencia de los ecosistemas y provocar contaminación del suelo, agua potable y pérdidas en la diversidad am-

biental, y con ello la disminución de cualquier Servicio Ecosistémico útil para la población humana (podría incluso afectar la Infraestructura Verde Vial). Asimismo, el déficit en el sistema educativo en las comunidades debilita la capacidad de las mismas para impulsar y hacer frente a su desarrollo y bienestar (Challenger y Dirzo, 2009; MA, 2005). Esto, por un lado, es de relevancia para promover el tipo de Infraestructura Verde Vial que podría contribuir a mejorar las condiciones del espacio, pero también puede ayudar a identificar factores que podrían afectarla. Es así como la teoría indica que identificar sitios de mayor o menor bienestar social contribuye a generar acciones y estrategias que mejoren ciertos servicios y además favorezcan la conservación.

Logrando establecer identidad y apropiación del territorio por parte de las comunidades, la gestión de la Infraestructura Verde Vial puede verse favorecida incluso disminuyendo costos de mantenimiento.

Con la información de campo y la obtenida en gabinete, es posible contar con un panorama amplio de la situación socioambiental de la zona. Esta información permite evaluar el potencial de servicios ecosistémicos y ambientales que se encuentran presentes en el área de estudio, y a partir de este potencial es que será posible determinar y planificar el tipo de obras que serán requeridas para la implementación de una Infraestructura Verde Vial.

2.1.3 Evaluación del potencial de la zona de estudio para ofertar servicios ecosistémicos y servicios ambientales

La ventaja de planificar la infraestructura vial con un enfoque de infraestructura verde en lugar de contemplar la ejecución de una infraestructura “gris”, radica en la multifuncionalidad, ya que esta última, a pesar de que facilita la provisión de beneficios sociales básicos, por lo general sólo cumple una función (en el caso de carreteras y vías férreas ésta es principalmente transportar), mientras que en la Infraestructura Verde Vial el atractivo clave es la multifuncionalidad, es decir, su capacidad para proporcionar varias funciones y beneficios en la misma área espacial (Dige *et al.*, 2014).

La Infraestructura Verde Vial se destaca por mejorar la calidad de vida de diferentes maneras, a través de sus aportaciones ambientales, sociales y económicas, todas ellas basadas en el uso multifuncional del capital natural (Gil-Hernández *et al.*, 2017), es decir, puede atender múltiples necesidades de forma simultánea: funciones ecológicas, productivas (económicas) y culturales, pretendiendo así mejorar el estado general de conservación de los ecosistemas y fortalecer sus funciones ecológicas que son las responsables de suministrarnos múltiples y valiosos servicios.

En este sentido, un sistema de Infraestructura Verde Vial debe ser eficaz y eficientemente planeado, diseñado, construido, modernizado y conservado mediante políticas integradas con respeto al ambiente, y que conservan el beneficio socioeconómico esperado en términos de movilidad y seguridad.

Reconocer el tipo de Infraestructura Verde Vial que debe ser construida para ofertar servicios, depende del potencial que tiene cada ecosistema para ofertarlos, por lo que para poder construir la Infraestructura Verde Vial, primero debemos conocer los servicios ecosistémicos que se verán afectados con la construcción de la infraestructura vial o en su defecto, el potencial de servicios ecosistémicos y ambientales que tiene la zona donde se implementará dicha obra.

La planeación de la Infraestructura Verde Vial no sólo debe ser llevada a cabo con el objetivo de mejorar la dinámica en la propia infraestructura vial, sino también de contribuir en la disminución del impacto causado por la fragmentación de la conectividad del sistema ambiental al cual pertenecerá dicha infraestructura. Su planificación ayuda a entender y conceptualizar los impactos ambientales, pero también a prevenir riesgos y desastres; así como a mejorar la red funcional del ecosistema evitando la pérdida total de servicios ecosistémicos y tal vez, mejorando otros y brindando servicios ambientales nuevos.

2.1.3.1 Evaluación de los servicios ecosistémicos y su multifuncionalidad

Una vez que se ha recopilado la información en campo y gabinete, ésta deberá ser evaluada bajo una perspectiva de servicios ecosistémicos y servicios ambientales. En este punto es importante aclarar que los servicios ambientales, en este modelo, dependen completamente de los servicios ecosistémicos, ya que éstos toman como base el recurso natural para después transformarlo y generar un beneficio alterno (esto es un claro ejemplo de la energía renovable). Es por ello por lo que, para identificar el potencial que tiene un área para ofertar servicios, la evaluación se realiza a partir de los servicios ecosistémicos con la intención de identificar, por un lado, las necesidades del área para implementar Infraestructura Verde Vial, pero también el potencial que tienen éstas para ofertarlo. La siguiente sección presenta algunas alternativas metodológicas para evaluar el potencial del área para ofertar servicios ecosistémicos y derivado de ellos, evaluar el potencial de los servicios ambientales. Es importante mencionar que estas estrategias no son las únicas y sólo tienen el objetivo de guiar al lector.

La propuesta metodológica que se plantea a continuación tiene como objetivo identificar, entender y diversificar, desde la caracterización de cuenca y microcuencas,¹¹ el valor funcional del espacio en términos de servicios ecosistémicos usando modelos multiescala (Trinidad-Lora, 2021).

La metodología toma como punto de partida los criterios de clasificación de servicios ecosistémicos propuestos por el MA (2005). Este enfoque considera cuatro líneas: soporte, regulación, provisión y culturales. Para cada línea se determinan distintos tipos de servicios ecosistémicos, cuyo cálculo se obtiene del análisis y reconocimiento de la condición actual de la vegetación con el uso de imágenes satelitales,

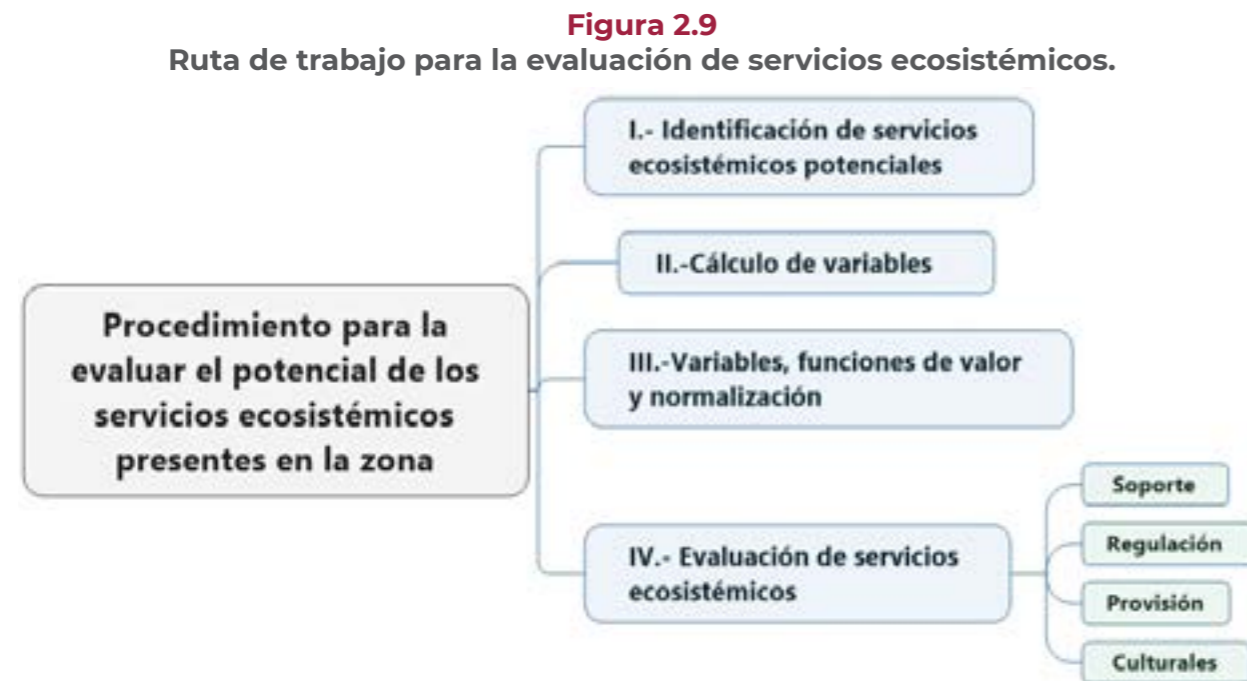
¹¹ El procedimiento para delimitar la cuenca de interés y a su vez las microcuencas dentro de ella, se llevó a cabo con ayuda del *Software* ArcGIS 10.1 y su extensión ArcSWAT 2012.10.18 del modelo SWAT2005. La delimitación de la cuenca en microcuencas permite referirse a distintas áreas de la vertiente de acuerdo con el espacio y así facilitar el análisis en diversas áreas dentro de la misma con diferentes tipos de uso de suelo (Uribe, 2010). Para fines de este trabajo se usó únicamente el módulo Watershed Delineator, el cual, además de la función para identificar y delimitar subcuencas, contiene funciones para el cálculo de parámetros geomorfológicos de cada una de ellas (Winchell *et al.*, 2009).

análisis de variables topográficas, hidrológicas, zonas de importancia antrópica y datos de verificación en campo.

Aunque la escala de información entre las variables es distinta, la baja resolución espacial de algunas de ellas se compensa, usando algunos otros datos de mayor resolución que de alguna manera contribuyen a dar explicación al mismo fenómeno (no siempre es posible realizar esta acción al no contar con información a esta escala).

Los resultados del análisis de estas variables se integran en una matriz por la línea de servicio ecosistémico, las cuales constituyen la base para reconocer la calidad de la unidad de análisis, en este caso, la microcuenca para después entender también la complejidad del sistema en el cual éstas forman parte y se encuentran inmersas (en este caso, la cuenca) y a partir de éste generan mapas por servicios ecosistémicos a nivel de microcuenca. El análisis propuesto resulta de utilidad para identificar y diversificar el valor de aporte que ofrece cada espacio en la cuenca en términos de servicios ecosistémicos.

A continuación se presenta la ruta de trabajo (Figura 2.9).



I. IDENTIFICACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS POTENCIALES.

Para la identificación de los servicios ecosistémicos, en la Tabla 2.7 se mencionan los que pueden ser evaluados. Esta propuesta considera las bases de datos presente en el país y de fácil acceso, por lo que sólo representa una sugerencia de variables para analizar dichos servicios. En este sentido, cada especialista podrá eliminar o incorporar las variables que considere necesarias o las disponibles para la zona de estudio.

Asimismo, los métodos de la tercera columna de la Tabla 2.7 requeridos para evaluar las variables que determinan servicios ecosistémicos pueden ser consultados en las Tablas del Anexo B) Clasificación morfométrica y el Anexo C) Consideraciones para el cálculo de variables que determinan servicios ecosistémicos y ambientales.

Tabla 2.7
Información para evaluar e identificar los servicios ecosistémicos en el área de estudio.

Análisis que deben ser elaborados	Servicios ecosistémicos a evaluar	Variables y/o bases de datos requeridos para obtener la información
Análisis espacial e identificación de servicios ecosistémicos.	Zonas potenciales para brindar servicios de soporte.	<ul style="list-style-type: none"> Cobertura vegetal. Potencial del ecosistema para retener agua. Heterogeneidad ambiental. Recarga de acuíferos.
	1.1. Potencial del ecosistema para retener agua.	<ul style="list-style-type: none"> Pendiente del cauce principal. Factor de forma. Densidad de corrientes perennes. Características del suelo. Manantiales y cuerpos de agua. Duración del periodo de lluvias. Orientación de laderas.
	1.2. Heterogeneidad ambiental.	<ul style="list-style-type: none"> Desnivel altitudinal. Número de tipos de vegetación y uso de suelo. Diversidad litológica. Diversidad de suelo. Puntos epicontinentales. Densidad de drenaje. Riqueza de especies y diversidad de especies de flora y fauna.
	1.3. Recarga de acuíferos.	<ul style="list-style-type: none"> Duración del periodo de lluvias. Permeabilidad de la roca (zonas de importancia hidrogeológica). Densidad de fallas. Características del suelo.
	2. Servicios ecosistémicos de regulación.	<ul style="list-style-type: none"> Cobertura Vegetal . Erosión. Potencial de Radiación. Modelos de Viento. Bienestar Social.

Análisis que deben ser elaborados	Servicios ecosistémicos a evaluar	Variables y/o bases de datos requeridos para obtener la información
	2.1. Erosión (consultar también Ficha 3 y Ficha 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente Orográfico. • Pendiente del cauce principal. • Pendiente media de la cuenca. • Duración del periodo de lluvias.
	2.2. Secuestro de carbono, polinización y control de plagas.	<ul style="list-style-type: none"> • Ecuaciones alométricas aplicadas a la cobertura vegetal. • Evaluación de los tipos de polinizadores y plagas.
	2.3. Potencial de radiación (consultar también Ficha 6 y Ficha 7).	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo digital de elevación (formula de radiación).
	2.4. Viento (Ficha 6 y Ficha 7).	<ul style="list-style-type: none"> • Datos de estaciones meteorológicas.
	2.5. Bienestar social (Ficha 8).	<ul style="list-style-type: none"> • Inverso del índice de marginación.
	3. Servicios ecosistémicos de provisión.	<ul style="list-style-type: none"> • Servicios diversos (mina, presas, manantiales, cuerpos de agua y bancos de material). • Agroecosistemas, alimentos (p. ej. frutas, nueces, hongos, miel y especias), leña, fibras, farmacéuticos y productos industriales. Además, animales como vacas, chivos y borregos en los sistemas silvopastoriles y estos animales son la fuente de muchos productos comerciales (p. ej. carne, leche, lana y cuero). La caza también es importante en los bosques de muchos países, ya sea para alimentación o como deporte, y puede ser crítica para la supervivencia de personas de bajo ingreso en los países en desarrollo.
	4. Servicios ecosistémicos y culturales (Ficha 8).	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de pueblos indígenas. • Zonas arqueológicas. • Sitios de importancia cultural.

Fuente: Tomado de Trinidad-Lora, 2021.

II. CÁLCULO DE VARIABLES.

En cuanto a la escala espacial de las variables, en muchas ocasiones se requiere hacer uso de técnicas que ayuden a evaluar a nivel regional los bienes y servicios que ofrecen los ecosistemas sin perder el orden de la relevancia a escala más detallada. No obstante, uno de los problemas que limita este tipo de análisis es la falta de información ambiental con suficiente grado de detalle, la cual permita analizar y generar información a escala detallada, al mismo tiempo que resulta muy costoso en tiempo y recursos generar información directamente de campo que ayude a validar los datos. Ante esta situación, se requiere hacer uso de información de distintas escalas y, por lo tanto, tras-

ladar información de escalas finas a otras más gruesas con la finalidad de disminuir la omisión de la heterogeneidad espacial. En la integración de diversas fuentes o niveles de observación, viene implícito un escalamiento de modelos (King *et al.*, 1991).

Realizar una caracterización de parámetros físicos y sociales en un estudio con una doble dimensión en cuanto a escala espacial (es decir, la cuenca general es representativa de una región, pero las microcuencas analizadas en su interior representan áreas de mayor detalle), resulta una tarea compleja (sobre todo, donde el área de trabajo es lo suficientemente extensa como para limitar el trabajo exhaustivo en campo, pero se requiere entender el espacio con una mayor resolución espacial), pero necesaria, ya que sólo analizando las escalas de mayor y menor detalle es que se puede abordar de manera adecuada el carácter jerárquico de los ecosistemas.

En este sentido, resulta indispensable determinar y compensar el análisis de las variables con menor resolución con variables de fácil medición que mejoren la resolución espacial y que sean clave para inferir el estado de las demás variables. Para esta situación, en esta propuesta metodológica se usa a la morfometría de cuencas que puede ser calculada con un Modelo Digital de Elevación (MDE) y con el uso de Imágenes Satelitales para calcular Índices de Vegetación.

Por un lado, la morfometría¹² resulta ser una herramienta útil en la caracterización de microcuencas, ésta, al enfocarse en los rasgos fisiográficos, los cuales se pueden obtener de un MDE a 15 m de resolución espacial, permite generar una caracterización a nivel de microcuenca. La morfometría resulta ser una herramienta clave en el análisis fisiográfico de una cuenca (sobre todo cuando se carece de información a detalle en la zona de estudio), ya que permite establecer parámetros de evaluación del funcionamiento y comportamiento de una cuenca a partir de la descripción de algunas de sus características físicas que guardan una estrecha relación con los procesos de modelación del paisaje (Anexo B). Clasificación morfométrica (Aparicio, 1992; Breña y Jacobo, 2006; Fuentes, 2004; Geissert, 2004; Jardí, 1985; Ortiz, 2004; Villón, 2004).

Finalmente las técnicas de teledetección resultan ser una herramienta útil en la identificación y análisis de la dinámica y el estado actual de la vegetación a partir de Índices de Vegetación, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Mejorado (EVI) entre otros, que ayudan a inferir el estado de conservación del lugar, acompañando así al análisis morfométrico a determinar las condiciones del sitio.

III. VARIABLES, FUNCIONES DE VALOR Y NORMALIZACIÓN.

Durante el análisis, las unidades de observación pueden estar caracterizadas por conjunto de variable expresadas en diversas escalas de medida. Desde el punto de vista cuantitativo, por ejemplo, la precipitación tiende a expresarse en una escala de razón y la temperatura se maneja en una escala de intervalo. De igual manera, existe información geográfica como el tipo de ocupación del suelo, que se manifiesta

¹² Las variables geomorfológicas obtenidas con SWAT se usan para realizar una caracterización morfométrica que, al mismo tiempo, dada la resolución de 15m del MDE ayuda a obtener información de las características de la zona a nivel de microcuenca, por ejemplo, se pueden identificar de primera instancia zonas de gran heterogeneidad ambiental, zonas con accidentada topografía potenciales a la erosión y dan apoyo para analizar otras variables de menor resolución espacial.

en forma nominal. Sin embargo, la presente metodología requiere que todos los criterios se expresen en una escala de razón única para poder ser comparados. Es por ello que se hace necesaria la transformación de variables para que puedan ser evaluadas entre sí y a una escala numérica común (Gómez, 2009). Para llevar a cabo este proceso, se aplica una función de valor dependiendo del comportamiento de la variable con respecto al fin analizado y posteriormente se normalizan.

Una función de valor busca unificar las unidades de los distintos indicadores a través de una escala de satisfacción. Dicha unificación se lleva a cabo en un intervalo entre 0 y 1, donde 0 representa el valor más bajo, 0.5 valor medio y 1 el valor de mayor jerarquía en este caso el valor óptimo para lo que se esté buscando. Para poder relacionar las distintas variables en el análisis de servicios ecosistémicos, se usaron funciones de valor y normalización basadas en el rango y comportamiento de las variables.

Todas las capas de información usadas deberán ser transformadas en variables cuantitativas y de razón, para lo cual se les aplica una función de valor dependiendo del comportamiento de la variable con respecto al fin analizado y posteriormente se normalizan. En este sentido, de cada una de las bases de datos de las variables modeladas se deberá identificar su comportamiento de acuerdo con la función. Es decir, para poder relacionarlas en el análisis de servicios ecosistémicos, la función de valor y normalización se basa en el rango, es decir, los valores mínimos y máximos de cada variable y su comportamiento con base en Y dentro de la curva según las funciones que se presentan en la siguiente Tabla:

Tabla 2.8

Funciones de valor usadas en el proceso de normalización de las variables.

Función	Ecuación
Cóncava creciente	$\text{Exp}(\text{Parámetro control} * [\text{capa_entrada}])$
Convexa creciente	$1 - \text{Exp} - \text{Parámetro_control} * [\text{capa_entrada}]$
Campana	$\text{Exp}(-\text{Pow}(\frac{[\text{capa_entrada}] - X_{\text{max}}}{\text{Amplitud}}, 2))$
Campana inversa	$\text{Exp}(-\text{Pow}(\frac{[\text{capa_entrada}] - X_{\text{min}}}{\text{Amplitud}}, 2))$
Convexa decreciente	$1 - \text{Exp}([\text{capa_entrada} - 30] / \text{Parámetro_control})$
Cóncava decreciente	$\text{Exp}(\text{capa_entrada} * - \text{Parámetro_control})$

El parámetro de control, Xmin, Xmax y la amplitud, representa en estas funciones un parámetro de ajuste en la curva y está definido dependiendo del rango de valores de cada variable “y” del comportamiento de ésta. En la Figura 2.10 y la Figura 2.11 se ejemplifica la configuración del modelo en Excel.

Figura 2.10 Esquema del programa usado en Excel para aplicar las funciones de valor y normalizar las variables. Modelos lineales y no lineales. El ejemplo muestra que los valores óptimos se tienen cuando la capa de entrada vale 100 y se normaliza con el valor 1.

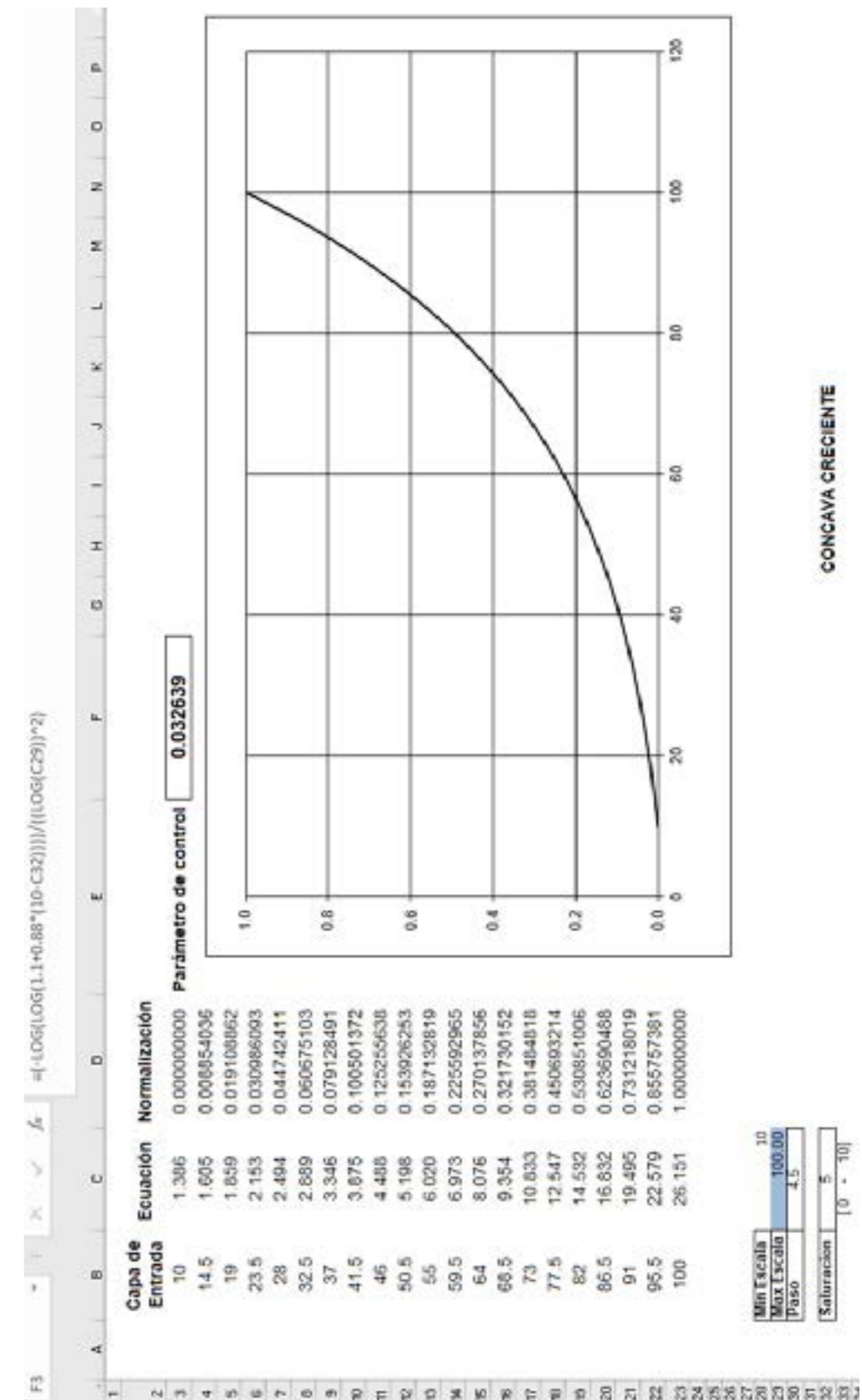
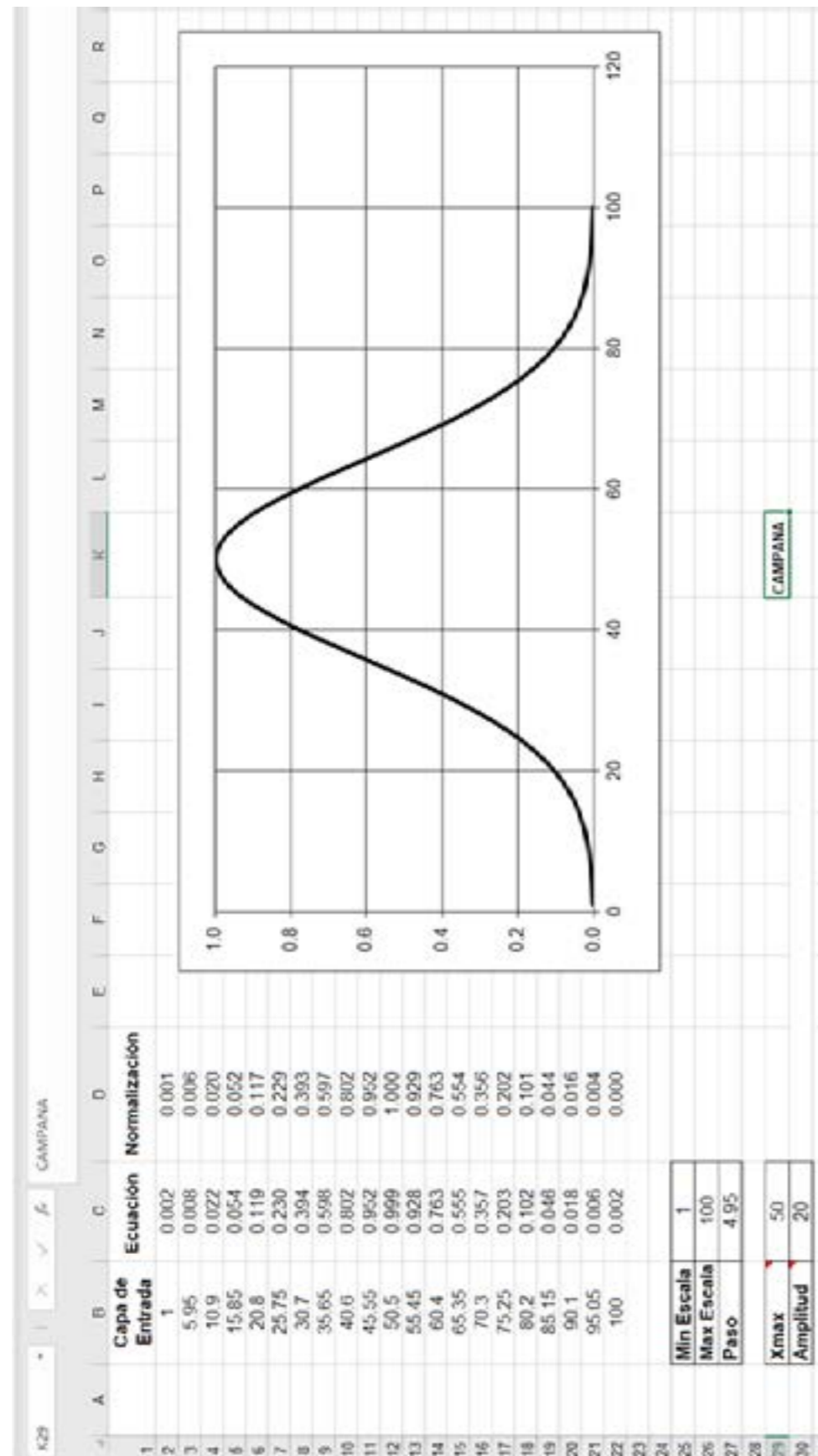


Figura 2.11 Esquema del programa usado en Excel para aplicar las funciones de valor y normalizar las variables. Modelo en forma de campana. El ejemplo muestra que los valores óptimos se tienen cuando la capa de entrada vale 50 y se normaliza con el valor 1.



Donde:

Parámetro de control para una función creciente=

$$\frac{-\log(\log(1.1 + 0.8 * (10 - saturación)))}{\log(máxima\ escala)^2}$$

Parámetro de control para una función decreciente=

$$10^{\left(\frac{3}{10} * \log((máxima\ escala)^5) - saturación\right)}$$

Saturación = factor de ajuste de la exponencial (qué tan curva o lineal es el comportamiento de la variable, se representa en una escala entre 0-10).

Máxima escala = valor máximo representado en la variable a analizar.

Mínima escala = valor mínimo representado en la variable a analizar.

Paso (intervalo de valores entre un valor tabulado y otro =

$$\frac{(Escala\ Máxima - Escala\ Mínima)}{20}$$

20 = el intervalo que existe entre 21 valores tabulados (ver Figura 2.11).

Campana = Xmax: media, mediana, moda o valor óptimo.

Amplitud = grado o nivel de apuntalamiento o achatamiento de la curva, desviación estándar de acuerdo con la variable analizada.

Capa de entrada = prorratio entre el valor anterior más el paso (ejemplo a partir del valor mínimo de la variable que es 10)(Figura 2.10) el siguiente valor estará dado por el mínimo + paso=14.5; el siguiente valor será 14.5+paso=19 hasta llegar al máximo, etcétera.

Ecuación o función: aplica según Tabla 2.8.

Posteriormente, aunque el valor de los criterios se encuentre expresado en valores de razón en cada variable, estos valores pueden ser mutuamente incompatibles si las escalas y las unidades de medida difieren entre sí.

En este sentido, la normalización resulta especialmente importante para producir una compensación entre los diferentes valores. No obstante, es importante mencionar que, sin el uso de estas funciones, no se tendría un control en los valores de normalización, la idea es que según el comportamiento de la variable con respecto a la curva los valores medios, sin importar cuáles sean éstos, queden normalizados con valores de 0.5 y de esta manera todas las variables usadas para explicar un fenómeno puedan ser comparadas, teniendo certeza de que sus valores potenciales se encuentran en la misma escala de medición.

En el ejemplo de la Figura 2.10, el valor que expresa el potencial medio para ofertar el servicio es de 82 y por lo tanto queda normalizado con valores de 0.5. La ecuación usada en este trabajo para normalizar es la siguiente:

$$\text{Normalización} = \frac{\text{Capa de entrada} - \text{Mínimo}}{\text{Máximo} - \text{Mínimo}}$$

Este proceso de normalización resta a cada valor del criterio considerando el valor mínimo que presenta dicho criterio y se divide entre el rango de los datos. Se interpreta como el porcentaje del rango y garantiza que los valores normalizados cubrirán el intervalo (0, 1), esto es, que el peor valor será 0 y el mejor 1.

Lo anterior, ya que este modelo sólo es una representación del comportamiento de los datos y el objetivo es obtener el parámetro de control. Posteriormente en un sistema de información geográfica, usando álgebra de mapas, se deberá aplicar a cada una de las variables la ecuación que le corresponda según la Tabla 2.8. En este caso, la capa de entrada será el archivo ráster de la variable y el parámetro de control el obtenido por el modelo de Excel. Finalmente, al resultado se le aplicará la ecuación de normalización.

El método de normalización propuesto a partir de funciones de valor no es el único que existe, por lo que la presente es sólo una propuesta y en determinado momento si se desea usar otro, el especialista deberá justificar su uso.

IV. EVALUACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.

En esta etapa se identifican a nivel de microcuenca los servicios ecosistémicos que cada una de ellas ofrece, la intención se encamina a diversificar los usos y resaltar la importancia que tiene cada espacio por sí mismo, esto ayudará en la elección del tipo de componente de la Infraestructura Verde Vial que es conveniente elegir dadas las características del espacio. Para ello, los datos normalizados de cada variable por microcuenca y tipo de servicios ecosistémicos se deberán integrar en una matriz, donde se suma el valor normalizado de cada una de las variables y posteriormente se vuelve a normalizar para obtener las cuencas más representativas del tipo de servicio ecosistémico que se esté mostrando.

Para cada tipo de servicio ecosistémico se asignarán distintas variables dependiendo del tipo de servicio. Un ejemplo de esta Tabla se muestra a continuación:

Tabla 2.9
Ejemplo de matriz para priorización de microcuencas.

Microcuenca	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Σ Variables	Valor normalizado
1	1	1	1	3	1
2	0.5	0.5	0.5	1.5	0.5
3	0	0	0	0	0

Ficha 9 EVALUACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Fase de aplicación:

Planeación.

Precepto o requerimientos:

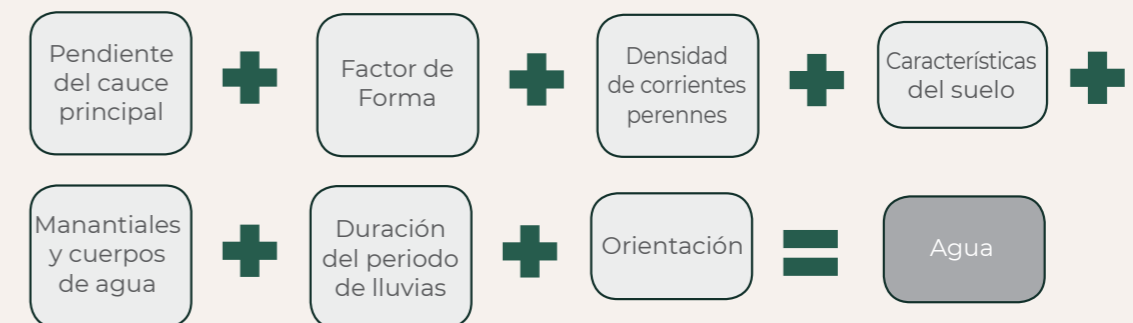
Este procedimiento requiere el uso de *softwares* de análisis espacial y de bases de datos espaciales. Aplicará en su mayoría álgebra de mapas.

Criterios metodológicos:

Una vez que se cuente con todos los mapas en formato ráster y normalizados (Tablas 2.1, 2.2 y 2.7) se procederá a evaluar esta matriz ráster (Tabla 2.9) usando álgebra de mapas y aplicando una suma de los valores, esta suma puede contar con una función del valor si es que alguna de las variables cuenta con mayor resolución o de ella se puede explicar con mayor fuerza el comportamiento del servicio ecosistémico.

Se seleccionan las variables por tipo de servicio ecosistémico considerando cómo éstas explican dicho servicio y considerando el orden de las variables de la Tabla 2.7. A continuación un ejemplo del uso de las variables:

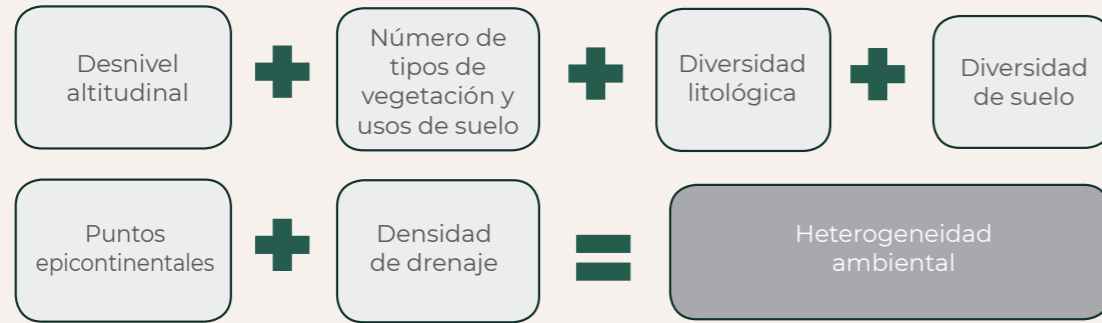
- Potencial de la zona para captar agua.



En esta relación de variables, la pendiente del cauce principal es una variable cuya presencia denota una función decreciente para la disponibilidad de agua. Es decir, a mayor pendiente del cauce menor disponibilidad de agua en el espacio. En este sentido, cabe resaltar que el factor de normalización usado para esta variable corresponde con una función cóncava decreciente, donde los valores más altos se han normalizado a 0. De esta manera, aun cuando se esté sumando el valor en la matriz, si constituye zonas de alto valor de pen-

diente, estas variables estarán sumando con un valor de 0 o cercano a 0; por el contrario, si los valores son bajos, las variables tendrán valor de 1 o cercano a 1. Asimismo, algunas consideraciones para evaluar al servicio ecosistémico de soporte se pueden consultar en la Tabla 2.7.

- Heterogeneidad ambiental.

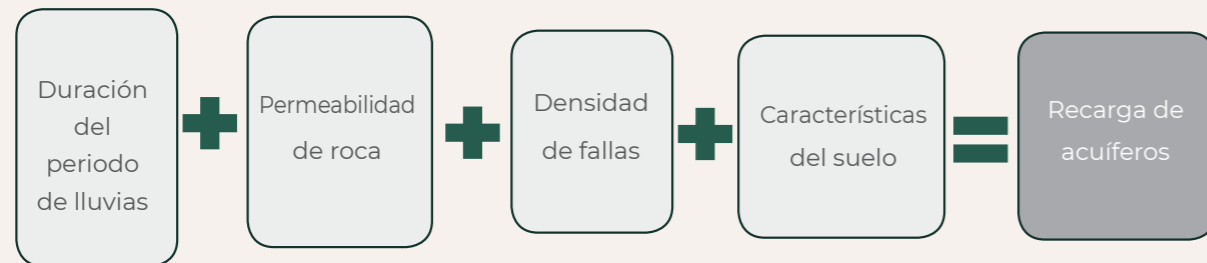


La presente metodología no se ha enfocado en medir la biodiversidad, pero ha tomado como referente la heterogeneidad ambiental como un indicador de la diversidad de ambientes. En este sentido, la evaluación busca identificar microcuencas donde estén presentes distintos patrones geográficos que favorezcan la heterogeneidad ambiental y, por lo tanto, se contribuya con la diversificación de hábitats y de especies. A esta suma también se puede sumar los valores de riqueza de especies de flora y fauna y por supuesto no se descarta el incluir valores de diversidad de flora y fauna de contar con ellos.

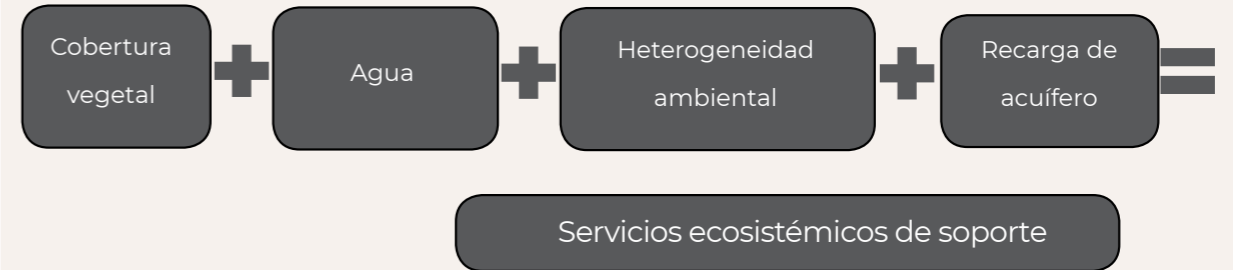
- Recarga de acuíferos.

Para identificar sitios con potencial de recarga de acuíferos, se usan las siguientes variables y éstas pueden ser complementadas con los resultados de los estudios geotécnicos y geohidrológicos que normalmente se elaboran como parte de la obra.

- Zonas potenciales para brindar servicios de soporte.



Este ejercicio con los sistemas de soporte se debe aplicar para cada uno de los servicios ecosistémicos (regulación, provisión y culturales) con sus respectivas variables, mismas que están representadas en la Tabla 2.7.



- Zonas potenciales para brindar servicios ecosistémicos en general.

Finalmente, para tener una relación de los sitios donde se presenta una mayor interacción de distintos servicios, se obtuvo a partir de álgebra de mapas la suma de los resultados por servicios ecosistémicos. En este caso se decidió priorizar a los servicios ecosistémicos de soporte bajo el supuesto de que sin estos servicios los demás tendrán menor probabilidad de existir. Cabe resaltar que en este nivel todos los valores han sido normalizados y cualquier valor entre 0 y 1 para las distintas variables tiene la misma relevancia, es por ello que pueden ser comparados entre sí y el objetivo es identificar áreas de mayor o menor aporte de servicios.



El análisis a partir de servicios ecosistémicos en esta metodología muestra la relevancia de cada espacio, permite identificar áreas de importancia para la conservación y se pueden reconocer aquellas que han tenido usos intensivos y que requieren mayor atención, es sobre éstas últimas donde se pueden implementar acciones de Infraestructura Verde Vial para mejorar el hábitat y por supuesto, implementando componentes de la Infraestructura Verde Vial que restablezcan el servicio ecosistémico afectado según el potencial del área para brindarlo. En este sentido, aun cuando el mapa final muestra el aporte general de servicios ecosistémicos, resulta de mayor relevancia entender los procesos y el aporte de cada servicio en particular, lo cual permite generar mayor conciencia de la funcionalidad del sistema y en este caso permitiría saber con mayor precisión cuál es el tipo de componentes de la Infraestructura Verde Vial que resultarían de mayor relevancia a implementar según el servicio ecosistémico afectado o el potencial del área para ofertarlo.

Reconocer la variabilidad de servicios que ofrece un espacio, es una tarea que permite contextualizar la importancia del lugar, diversificar y optimizar los usos, al mismo tiempo que brinda una herramienta que podría facilitar el diálogo de interés común sobre el tema entre diferentes sectores sociales, promoviendo así la concientización, protección y gestión de sus ecosistemas boscosos.

El conocimiento de la multifuncionalidad del área permite planificar mejor el tipo de Infraestructura Verde Vial que debe dirigirse para permear los sitios.

La metodología empleada en el presente estudio permite de manera general identificar servicios ecosistémicos a nivel de microcuenca en las cuatro categorías propuestas por el MA (soporte, regulación, provisión y culturales) a partir de una selección de variables en función de la disponibilidad de datos espaciales en la zona de estudio y de su relevancia en términos de servicios ecosistémicos. Las funciones de valor y la normalización constituyen una importante herramienta para poder comparar y relacionar las variables usadas en cada matriz ráster al unificar los valores. Asimismo, el uso de variables con mayor resolución espacial como las imágenes satelitales y la morfometría, conformarán un elemento clave para poder escalar la información de menor resolución espacial y así poder explicar a nivel de microcuenca la conformación de servicios ecosistémicos.

Un esquema general de la metodología planteada se tiene en la siguiente Figura.

Figura 2.12
Esquema metodológico general de las variables y su uso para identificar y evaluar servicios ecosistémicos.



Fuente: Tomado de: Trinidad-Lora, 2021.

2.1.4 Elaboración del diagnóstico y establecimiento de objetivos de diseño y construcción referentes a la Infraestructura Verde Vial

I. DIAGNÓSTICO.

Con base en la información obtenida en los pasos previos, es necesaria la elaboración de un diagnóstico que refleje el estado actual sobre las necesidades locales en relación con el tema, particularmente, la relevancia de considerar prioritarias las acciones de Infraestructura Verde Vial como parte crucial del espacio en el que se pretende implementar dicha infraestructura.

Esta tarea implica, además la revisión y complemento de investigación con otros datos que son complementarios, sobre las condiciones territoriales, urbanas, ambientales y de Cambio Climático (Quiroz-Benítez, 2018).

- a) Revisión, clasificación y análisis de la información obtenida.
- b) Análisis de los vínculos entre los marcos normativos específicos, sus alcances, limitantes y áreas de oportunidad para implementar algún tipo de Infraestructura Verde Vial.
- c) Análisis del marco programático que permita detectar acciones relacionadas con la Infraestructura Verde Vial en planes, estrategias o programas sobre desarrollo sustentable, desarrollo urbano, movilidad y Cambio Climático. Es decir, qué acciones están previstas o implementadas que puedan ser mejoradas si se incluye Infraestructura Verde Vial.
- d) Análisis territorial e información cartográfica, mediante la revisión de planes de ordenamiento territorial y programas de ordenamiento ecológico estatal y local. El uso de planos, mapas y cartas de utilidad para la problemática en el territorio y para definir con precisión las áreas a intervenir.
- e) A partir de la Identificación de las necesidades de servicios ecosistémicos, requiere investigación de campo aplicada en aquellas áreas con la necesidad de intervención con componentes específicos de Infraestructura Verde Vial.
- f) Con la información obtenida se deberán describir, de manera coherente, un diagnóstico con los hallazgos de este proceso, sus vínculos, oportunidades, necesidades y áreas de oportunidad.

II. ESTABLECIMIENTO DE OBJETIVOS, TIPOS DE ESTRUCTURAS DE INFRAESTRUCTURA VERDE VIAL.

Con el diagnóstico elaborado, se procederá a evaluar los tipos de componentes de la Infraestructura Verde Vial que pueden ser implementados según el potencial o la necesidad del área, y con la intención de que éstos se relacionen con un desarrollo armónico del territorio en el marco de la planeación, diseño, construcción, conservación y operación de la Infraestructura Verde Vial.

Algunos procesos metodológicos que pueden ser de utilidad para la selección de los objetivos considerando que éstos deben ser seleccionados a partir de su multifuncionalidad, son los siguientes:

- Metodología de toma de decisiones multicriterio (apoyada en *software* libre como Super Decisions), para establecer a través de la ponderación de elementos, aquéllos que contribuyen en mayor o menor consecución de una meta, propósito u objetivo.
- Marco lógico, FODA, árbol de decisiones, entre otros. Son metodologías ampliamente conocidas, aceptadas y utilizadas en el marco de la planeación de proyectos estratégicos, programas y planes de desarrollo en distintas escalas territoriales.
- Establecer ejes temáticos sobre los cuales se deberán de regir los equipos de trabajo, los proyectos y las acciones para la implementación de los proyectos de Infraestructura Verde Vial.

III. GRUPOS DE TRABAJO.

Una vez identificados los elementos que conformarán la obra de Infraestructura Verde Vial, se deberán establecer grupos de trabajo, agrupando los componentes de Infraestructura Verde Vial, junto con las acciones que los acompañen. Cada grupo tendrá naturalmente objetivos, procesos y estrategias, que no necesariamente coincidirán con otros grupos de la misma esfera y ámbito de planeación e implementación de proyectos, por ello, para la consecución de los tipos de componentes de Infraestructura Verde Vial a ejecutar, se deberán agrupar aquellas metas, objetivos y estrategias afines. Éstas se podrán poner en distintos niveles de preponderancia para la consecución del objetivo común, en este caso el desarrollo armónico del proyecto de Infraestructura Verde Vial.

El grupo de expertos seleccionará desde esta etapa los indicadores de medición, evaluación y seguimiento que aplicarán para evaluar cada elemento que integre a la Infraestructura Verde Vial.

IV. ESTABLECIMIENTO DE ACCIONES.

Cada equipo de trabajo deberá elegir las acciones que ayudarán a cumplir la meta, en este caso la implementación de los componentes de la Infraestructura Verde Vial. Las acciones son las que darán al proceso el soporte para medir su resultado y corregir en su caso lo necesario para cumplirlo. En este sentido, resulta prioritario que la elección de las acciones sea capaz de cumplir con más de un propósito.

Las acciones dependen finalmente de los indicadores de medición, evaluación y seguimiento, definidas para cada objetivo. Es a través de estos indicadores donde se medirá el éxito de todo el proceso, y por lo cual adquieren una importancia relevante, pues es por medio de ellos que se podrá medir el cumplimiento de las metas.

Se desprenden de estos criterios de planeación, coincidencias que, a través de distintas perspectivas, concluyen en acciones de mejora integral de un proyecto bajo su contexto socioambiental inmediato. Por tanto, se puede establecer que las acciones prioritarias serán aquellas que cumplan con el mayor número de propósitos o que atienden el mayor número de necesidades.

Algunos de los componentes de la Infraestructura Verde Vial que se pueden seleccionar como ejes de un proyecto sustentable y según las necesidades del sitio se describen en el siguiente capítulo.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA
DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

CAPÍTULO 3

TIPOS DE COMPONENTES DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE VIAL

Generalidades

Una vez identificado el potencial para ofertar servicios ecosistémicos e identificados los sitios donde es necesario implementar acciones para fortalecer la conectividad y potencializar estos servicios, se puede seleccionar y discutir los tipos de componentes con potencial de implementación de la Infraestructura Verde Vial.

La selección del tipo de componentes que conformará la Infraestructura Verde Vial es uno de los pasos más determinantes en cuanto a los servicios ecosistémicos y ambientales que se busca conservar y/o generar y lo que se busca con su implementación es lograr la máxima multifuncionalidad de los servicios referidos. En este sentido, es posible que se utilice más de un tipo de componente priorizando los diseños o combinaciones de componentes que permitan realizar más de una función y por supuesto en consideración con un análisis de costo-beneficio adecuadamente elaborado sobre las alternativas que se hayan identificado como viables.

A fin de ofrecer alternativas sobre componentes que es posible implementar en la Infraestructura Verde Vial, en este capítulo se presentan y describen diversos sistemas y tecnologías en materia de hidrología, suelo, vegetación, energía renovable, pavimentos reciclados y permeables, así como sistemas antirruído y sistemas inteligentes de transporte, entre otros que pueden ser propuestos para integrar una Infraestructura Verde Vial.

Aunque se ha buscado agrupar a estos componentes por el tipo de beneficios que pueden generar, muchos de ellos tienen la cualidad de ser multifuncionales. De acuerdo con las funciones que los componentes desempeñan dentro de la Infraestructura Verde Vial, se les ha agrupado en dos bloques: componentes que brindan servicios ecosistémicos y componentes que brindan servicios ambientales.

3.1 Componentes de la Infraestructura Verde Vial que brindan servicios ecosistémicos

3.1.1 Vegetación en el derecho de vía

La cobertura vegetal es uno de los elementos más importantes en la configuración de la Infraestructura Verde Vial, pues como ya se ha mencionado, constituye un servicio ecosistémico de soporte (en unión con el suelo y el agua, vistos como un sistema) y, por lo tanto, de su presencia y su configuración depende el éxito de cualquier proyecto de Infraestructura Verde Vial que pretenda conservar y promover servicios ecosistémicos.

En este sentido, la vegetación del derecho de vía puede llevar a cabo muchas funciones incluyendo: amortiguar el ruido vehicular, controlar la erosión, proporcionar hábitat a flora y fauna, regular el microclima, proporcionar beneficios estéticos, capturar carbono, disminuir corrientes de viento, entre otras. Sin embargo, no hay que perder el punto de vista de que la vegetación puede ocasionar un riesgo adicional a los conductores, por lo cual es necesario tomar las consideraciones necesarias para la instauración de la cubierta vegetal. La vegetación del derecho de vía debe conciliar el paisaje, la ecología y la seguridad vial de los usuarios de los caminos.

El derecho de vía es la superficie de terreno requerido para la construcción, conservación, modernización y en general, para el uso adecuado de una carretera y de sus servicios auxiliares. En este sentido es el lugar donde están alojados todos los elementos que constituyen la infraestructura de las carreteras, autopistas y puentes, asimismo, puede alojar obras e instalaciones de carácter diverso (Ruiz, 2018). En virtud de lo anterior el uso adecuado del derecho de vía y su preservación es cada día más importante.

En el derecho de vía se llevan a cabo actividades para la construcción y conservación de la infraestructura vial, actividades que pueden modificar el territorio y el paisaje, y causar impactos ambientales. La ubicación geográfica, el tipo, la frecuencia e intensidad de la actividad, el área de afectación, el uso de suelo y la cubierta vegetal anterior a una construcción, son factores determinantes del impacto ambiental generado. La recuperación de la vegetación de estas áreas es de vital importancia para mantener parte de los servicios ecosistémicos que se ofrecían antes de la construcción de la infraestructura vial. Para ello, es necesario identificar las acciones y obras que hacen susceptibles a los recursos naturales dentro del derecho de vía y que requieren ser intervenidos para recuperar las funciones ecológicas y al mismo tiempo garantizar la seguridad de los usuarios.

En el derecho de vía el manejo de la vegetación puede ser más o menos intenso y puede estar dominado por vegetación herbácea, arbustiva y arbórea, dependiendo de la distancia al cuerpo de la vía. Las plantas en esta zona tienden a crecer rápidamente y están adaptadas a la luz directa y estrés hídrico por la falta de riego.

Las plantas dominantes o exóticas tienen grandes ventajas de crecimiento en estas áreas ya que son tolerantes a las perturbaciones, especialmente cuando se presenta un manejo intensivo, sin embargo, deben evitarse las especies exóticas ya que pueden dispersarse en ecosistemas naturales cercanos. Se ha visto que gracias a la turbulencia de aire que generan los vehículos, las semillas de estas especies son transportadas y depositadas a lo largo de las vías o incluso se ha visto su dispersión en distancias mayores a un kilómetro, llegando así a ecosistemas naturales cercanos y, por lo tanto, generando competencia con la vegetación nativa favoreciendo la incorporación de plagas y su destrucción.

El establecimiento de comunidades de plantas nativas en el derecho de vía tiene ventajas económicas y ecológicas a largo plazo (Berger, 2005). Las especies de plantas amigables para los polinizadores, muchas de las cuales son plantas con flores, pueden mejorar la experiencia del usuario creando un paisaje natural atractivo por la diversidad de formas y colores, además de mejorar el desempeño del conductor, reduciendo la monotonía y el estrés (Figura 3.1).

Figura 3.1
Campo floreciente a un costado del camino para impulsar la polinización en Dinamarca.



Fuente: Tomado de <https://www.opia.cl/601/w3-article-116516.html>

En paisajes en los que la mayor parte de la vegetación nativa ha sido removida para el cultivo o pasturas, el derecho de vía es particularmente valioso como reservorio de diversidad biológica. Plantar especies nativas de las praderas a lo largo de la infraestructura vial, además de proporcionar belleza estética, puede funcionar como corredor biológico de polinizadores (colibríes, mariposas, escarabajos, etcétera).

Algunas de las ventajas del uso de la vegetación nativas sobre la vegetación introducida son:

- Estabilidad de los ecosistemas.

Ayudan a mantener el delicado equilibrio de los ecosistemas, ya sean naturales o antropizados.

- Control de plagas.

Poseen insectos asociados que controlan el crecimiento de las plagas, al controlar sus poblaciones y evitar que se propaguen exponencialmente, a la vez, estos insectos sirven como alimento para aves o reptiles que en conjunto forman el ecosistema.

- Consumo de agua.

Las especies nativas son de modo natural eficientes con el consumo hídrico al haber adaptado su estructura biológica al régimen pluviométrico de la región a lo largo de generaciones.

- Infiltración del agua de lluvia.

Al encontrarse las especies nativas adaptadas a una región, consumen menos agua de lluvia, dejando infiltrar una mayor cantidad de ésta al subsuelo.

- Resistencia al suelo.

Las especies nativas se encuentran adaptadas para crecer en suelos con carencias minerales, altamente salinos, rocosos, volcánicos u otros, según la región en la que se desarrollen; las especies exóticas rara vez sobreviven al periodo de adaptación cuando son introducidas en un hábitat diferente.

- Propagación.

Como son plantas adaptadas al sistema, se pueden automultiplicar sin la ayuda del ser humano.

- Mantenimiento.

Al haber sobrevivido sin la ayuda del hombre durante miles de años, requieren de un mantenimiento mínimo o nulo que puede verse traducido en la reducción de los costos de mantenimiento y en el tiempo invertido en el mismo.

- Cualidades etnobotánicas.

Las especies nativas tienen un fuerte vínculo con la sociedad en comparación con las especies introducidas, pues las primeras forman parte de la cultura de los habitantes de una región.

- Integración al paisaje.

Las especies nativas se integran con mayor facilidad al paisaje urbano y rural, al adaptarse al entorno armónica y paulatinamente.

En términos generales, la implementación de la vegetación en la Infraestructura Verde Vial tiene como principal objetivo ser un factor que aumente la capacidad de recarga ecológica de las infraestructuras viales, incrementando la cobertura vegetal nativa y la superficie de conectividad ecológica. El adecuado funcionamiento de los corredores biológicos o de la conectividad ecológica es primordial para conservar la dinámica de las poblaciones mediante el continuo intercambio genético, la distribución natural de las especies de flora y fauna silvestres y otros flujos ecológicos, por esta razón, tanto su subsistencia como la incorporación de tácticas para beneficiar dicha conectividad forman parte de las acciones necesarias que se deben implementar en la Infraestructura Verde Vial.

Algunos ejemplos de acciones encaminadas a preservar los corredores son el enriquecimiento de las franjas ubicadas al lado de las vías con especies vegetales nativas, ya sea arbóreas, arbustivas o herbáceas, minimizando así el efecto barrera causado por la vialidad, o para minimizar impactos ambientales o fenómenos que representen una amenaza. En este punto vale la pena mencionar que, si bien es necesaria la implementación de la vegetación en el derecho de vía, también es importante considerar que el aumento en la dinámica ecosistémica, como el incremento de las poblaciones entomológicas y de polinizadores, aves, reptiles y otros animales que se alimentan de frutos y/o semillas, así como aquéllos que a la par buscan resguardo en la vegetación, podrían sumar al número de incidentes indeseados como son los atropellos a la fauna e impactos en la población de insectos al colisionar con los vehículos. Es por esta razón que la planificación de este tipo de actividades cobra un papel fundamental para poder visualizar los posibles impactos y dar respuesta y solución a ellos desde etapas tempranas, con la realización de análisis de flora y fauna que permitan entender las dinámicas ecosistémicas que se quieren conservar y fomentar.

Por otro lado, dentro del derecho de vía, algunas de las funciones de la vegetación como componente de la Infraestructura Verde Vial también pueden contribuir con los siguientes beneficios:

- Captura de carbono.

Desde el siglo pasado el aumento en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero ha contribuido al Cambio Climático y ha impulsado investigaciones para reducir la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO₂), el gas de mayor relevancia. En este sentido, dos de las estrategias para reducir la concentración de carbono atmosférico, generado por emisiones antrópicas, incluyen la captura y el almacenamiento de CO₂ en la biósfera de la Tierra (secuestro terrestre) o en formaciones geológicas profundas (secuestro geológico) (Lal, 2008). En el estudio del secuestro terrestre de carbono, el suelo se torna relevante (Lal, 2010) porque contiene más carbono que la atmósfera y los bosques (Donovan, 2013). Este concepto sustenta la reciente iniciativa global para incrementar el carbono orgánico del suelo (COS) a niveles de 0.4% por año.

La vegetación y los suelos son componentes de interés para el secuestro del carbono, es por ello que recientemente se ha incrementado el interés de estos elementos como almacenes de carbono en la infraestructura vial. Se ha estimado que de manera conjunta las carreteras y autopistas federales en los Estados Unidos de América tienen la capacidad de secuestrar anualmente aproximadamente 10 millones de toneladas métricas (MTM) de carbón. El potencial de secuestro de carbono entonces en esta infraestructura vial representa aproximadamente el 0.6% de las emisiones antrópicas totales.

Durante su crecimiento la vegetación puede acumular grandes cantidades de carbono en forma sólida (proveniente del CO₂ atmosférico) para formar estructuras como: tallos, ramas, raíces, hojas, flores y frutos. Cuando estas estructuras mueren, se descomponen o mineralizan, trasladan al suelo el carbono acumulado. De acuerdo con el balance natural de este proceso, una parte del carbono del suelo regresa a la atmósfera en forma de gas (dióxido de carbono) al combinarse con el oxígeno del aire.

- Estabilidad de una ladera.

La deforestación afecta directamente la estabilidad del suelo produciendo la disminución de la tensión capilar de la humedad superficial, facilitando la remoción de partículas de suelo que contribuyen con la erosión. Para evitar la erosión del suelo, sobre todo en las laderas o zonas de fuerte viento y/o lluvia es necesario mantener un alto porcentaje de cubierta vegetal, una densa red de raíces y un horizonte orgánico profundo en la superficie.

La vegetación ayuda a detener parte de la lluvia, incrementa la capacidad de infiltración, bombea la humedad del suelo al exterior; las raíces refuerzan el suelo aumentando su resistencia, anclan el suelo superficial a mantos más profundos y detienen las partículas del suelo disminuyendo la susceptibilidad a la erosión.

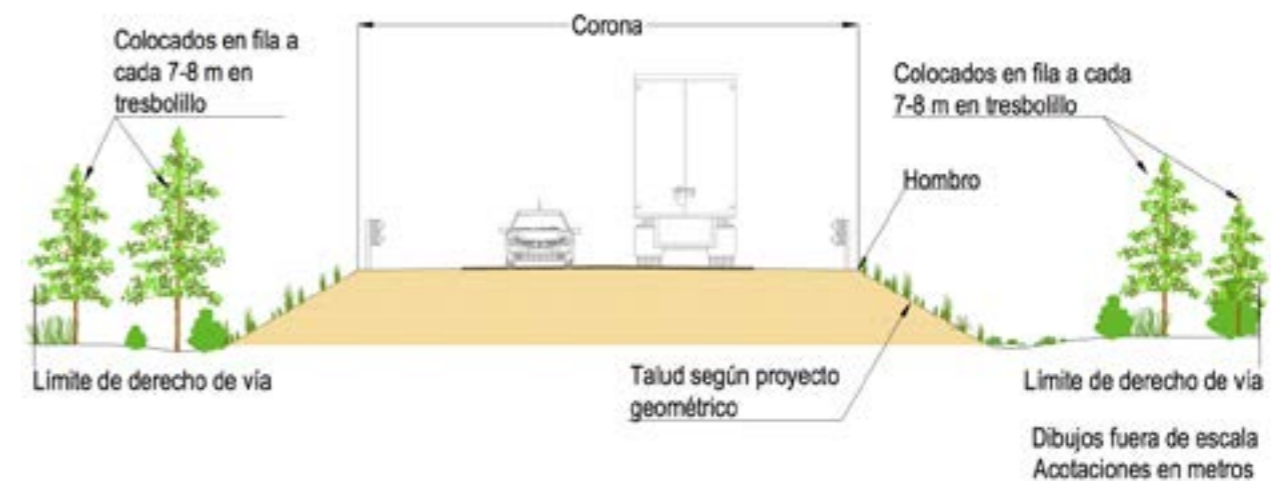
- Amortiguamiento del ruido y el viento.

Particularmente en las áreas urbanas o rurales, la vegetación también se emplea comúnmente para reducir el sonido de los vehículos al transitar por la infraestructura vial, árboles y arbustos altos son utilizados con este fin y así proteger a la población de este impacto ya que puede absorber y reflejar el ruido debido a las características de sus hojas, en cuanto a la estructura de la barrera el ancho y largo de ésta pueden mejorar la reducción del ruido. La vegetación debe ser alta, ancha y suficientemente densa para bloquear el ruido. Se trata del establecimiento de líneas combinadas arbóreas-arbustivas perennes que constan de al menos 2 o hasta 10 líneas de árboles de diferentes tamaños y velocidades de crecimiento que forman en su conjunto un "muro vivo". En este sentido, en cuanto más hojas y más densos sean los árboles y arbustos, la barrera absorberá el sonido de mejor manera. Esta indicación así como cualquier otra dentro de este manual debe ser evaluada siempre en términos de la seguridad vial, por lo que el diseño estará siempre sujeto a esta condicionante.

Por otro lado, para amortiguar el viento, se colocan dependiendo del flujo del viento. La selección apropiada de la vegetación y sus propiedades ayuda a minimizar factores como la fuerza y la alineación del viento cruzado, la velocidad del viento y la dispersión y acumulación de polvo.

Los espacios abiertos frecuentemente incrementan la velocidad del viento afectando a vehículos y ciclistas. Las barreras de árboles o arbustos pequeños no son muy eficientes para reducir la velocidad del viento, por lo que dimensionar componentes de vegetación con este objetivo es muy importante para lograr los resultados esperados.

Figura 3.2
Barreras de vegetación colocadas a un costado de la carretera para minimizar el ruido y el viento.



3.1.2 Terrazas en taludes de corte, terraplén y/o laderas

Durante la construcción de una infraestructura vial, los cortes, excavaciones ejecutadas a cielo abierto en el terreno natural, la ampliación de taludes, o creación de terraplenes son actividades que implican un cambio en la conformación de una ladera. En este sentido, dependiendo de las características que ésta presente (estructura, estratigrafía, condiciones de meteorización, topografía de la zona, tipo de suelo, pendiente litología, humedad, etc.) puede entrar en un proceso dinámico de inestabilidad y por lo tanto generar procesos de remoción en masa que pueden desencadenar en desastres. Por lo tanto, al concebir un proyecto es necesario implementar estrategias que minimicen este riesgo.

Una de las estrategias que se usan para suavizar las pendientes de los cortes y terraplenes, es la construcción de terrazas (Martínez *et al.*, 2009). En términos de Infraestructura Verde Vial, las terrazas son formadas por bordos de tierra o la combinación de bordos y canales, construidos en sentido perpendicular a la pendiente de los terrenos. Su construcción puede cumplir diferentes funciones con la correcta estabilización del talud como son:

- Reducir la erosión.
- Aumentar la infiltración del agua.
- Disminuir el volumen de escurrimientos que llega aguas abajo.
- Reducir el contenido de sedimentos en las aguas de esorrentía.
- Revegetar las zonas aledañas a las carreteras.

Los diseños de las terrazas dependen de los objetivos que van a cumplir, así como de factores climáticos y de las propiedades de los suelos. En áreas húmedas (normalmente en lugares con precipitación > 800 mm) son usadas fundamentalmente para controlar la erosión, mejorar el drenaje superficial y reducir los "picos de las crecientes" que se generan en una cuenca en caso de tormentas más o menos intensas

con laderas sin terraplén. En áreas con menores precipitaciones y zonas semiáridas, el objetivo principal es conservar el agua disminuyendo los caudales de los escurrimientos, por lo cual la reducción de la erosión es un objetivo secundario.

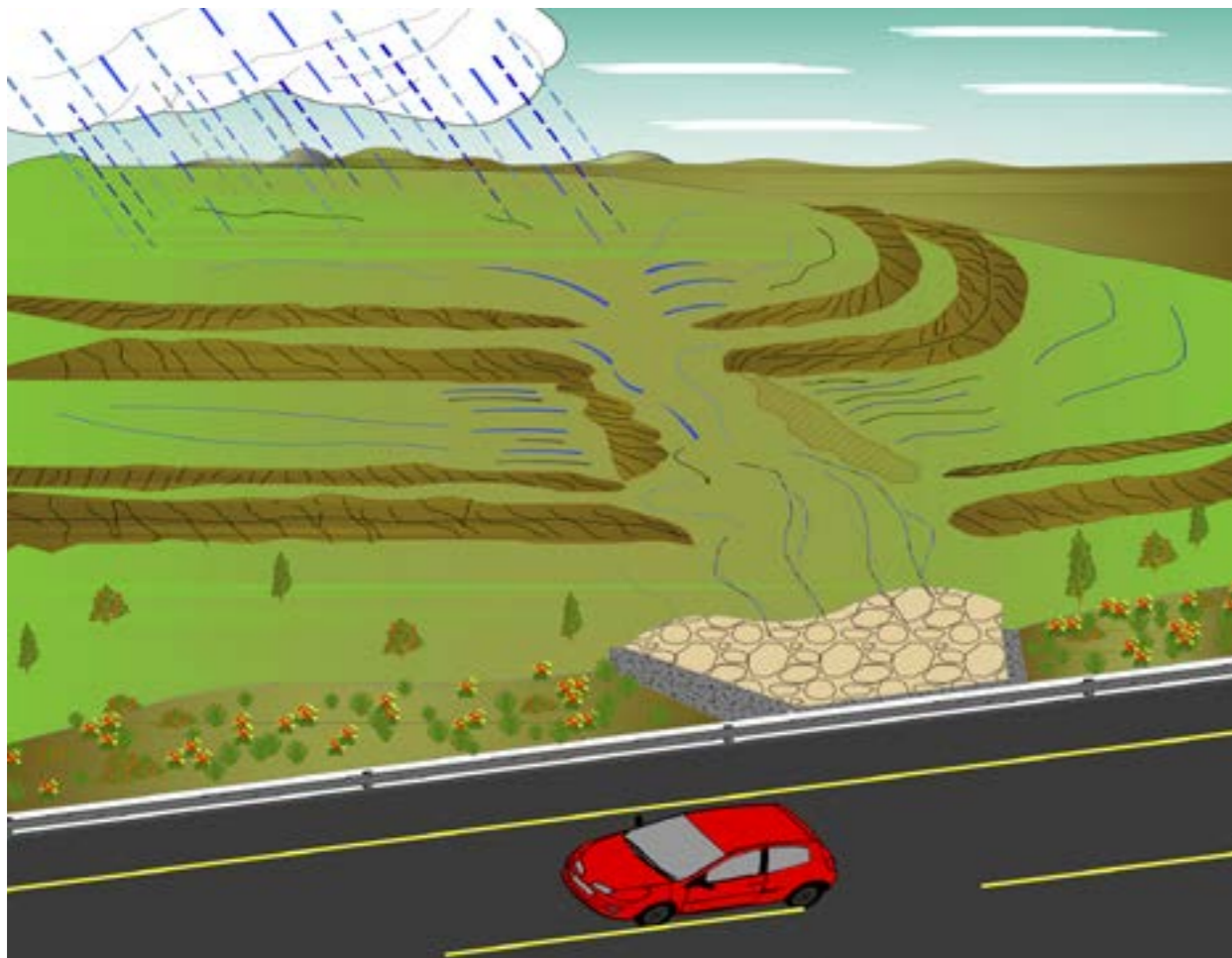
Las limitantes para la construcción de terrazas son el tipo de suelo, la rocosidad de los terrenos y los costos de construcción. Se ha documentado la siguiente clasificación de terrazas.

I. POR LA CONDICIÓN DE ESCURRIMIENTO.

- Terrazas a declive.

Estas terrazas cumplen la función de drenar lentamente las laderas inclinadas, se utilizan en áreas con precipitación anual mayor de 800 mm o con características de permeabilidad y profundidad de los suelos que propician la acumulación excesiva de agua que es necesario desalojar hacia una salida natural o artificial debidamente protegida. Se proponen en suelos de textura media y fina y poco profundos (Leptosol, Feozem). En la siguiente Figura se muestra un esquema de su configuración.

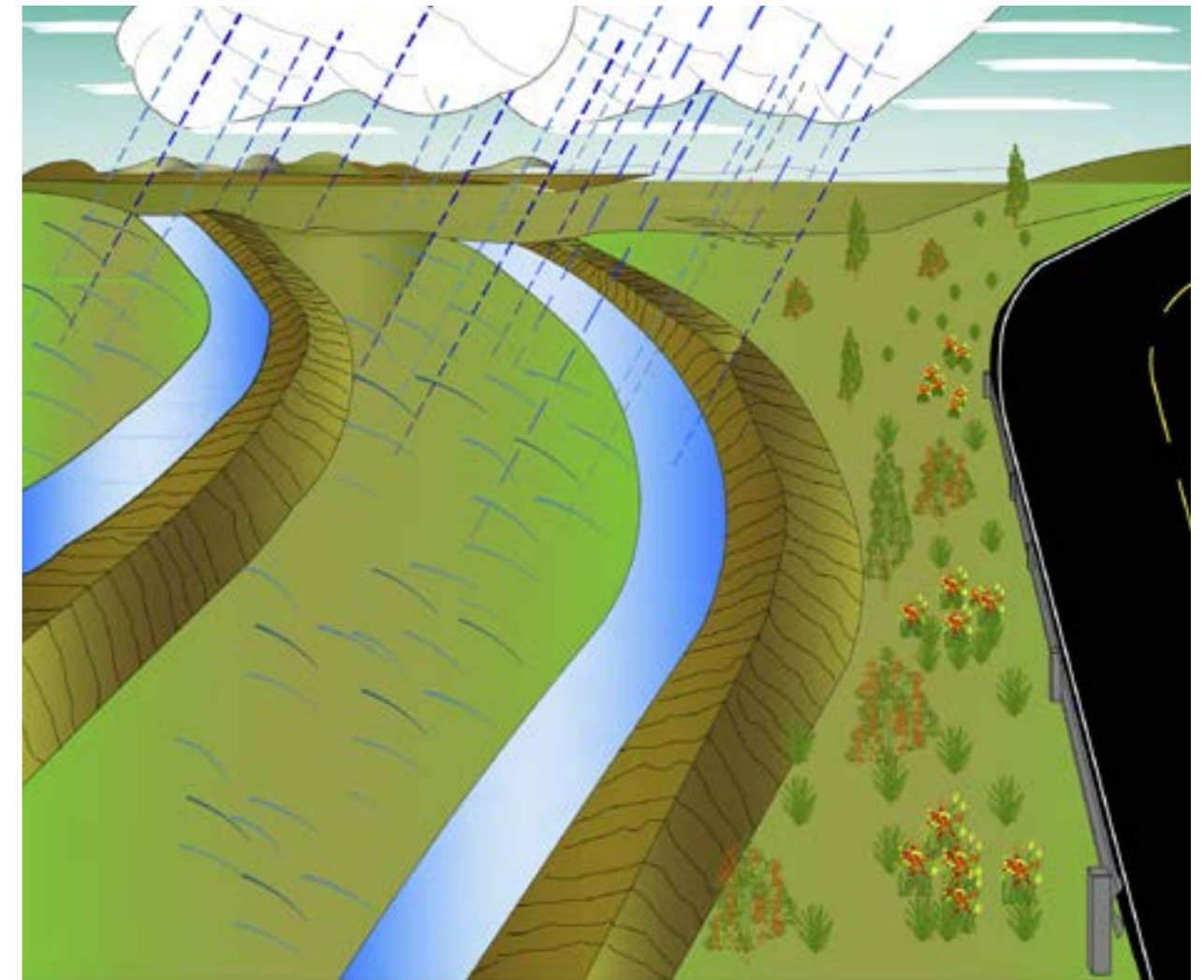
Figura 3.3
Esquema de una terraza a declive.



- Terrazas a nivel.

Estos terraplenes cumplen la función de almacenar agua. Se recomiendan en áreas con precipitaciones menores de 800 mm anuales, o donde los suelos son profundos, con buena permeabilidad y capaces de retener toda el agua de lluvia. A este tipo de terraplenes se le conoce también como de absorción, ya que los excesos de agua se infiltran a través del suelo y permiten almacenar el agua para las plantas. Se recomiendan en suelo de textura media y gruesa (por ejemplo, Regosol).

Figura 3.4
Esquema de una terraza a nivel.



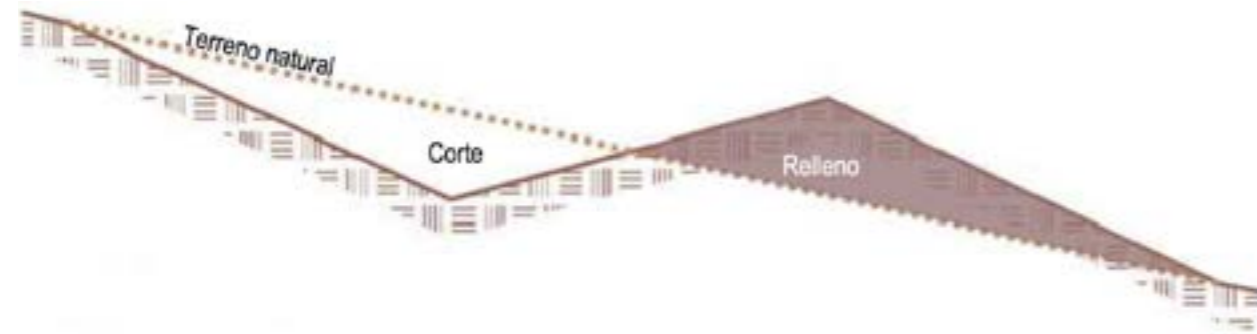
II. DE ACUERDO CON LA SECCIÓN TRANSVERSAL.

- Terrazas de base ancha.

Son secciones transversales amplias que se construyen de manera que se permite realizar un laboreo (proceso de remoción de la tierra para generar en este caso montículos y surcos en toda la sección transversal). Las pendientes del bordo y el canal se proyectan para permitir el paso de la maquinaria de acuerdo con el ancho de ésta.

Son aprovechadas para el establecimiento de vegetación arbórea. Se recomiendan en suelos con textura media y gruesa.

Figura 3.5
Esquema de una terraza de base ancha.



Este sistema se construye en una serie de bancales en forma alterna con fajas de terreno de cultivo o natural en donde no se realiza ningún movimiento. Permiten estabilizar el terreno y favorecer la diversidad de especies.

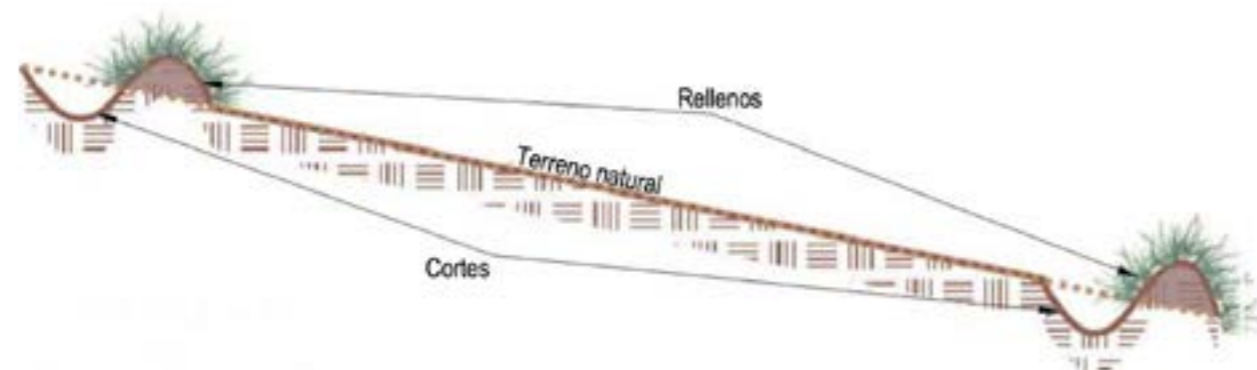
Figura 3.6
Esquema de una terraza de bancos alternos.



- Terrazas de base angosta.

Están conformadas por un pequeño bordo y un canal a nivel o con pendiente, el bordo se debe proteger con vegetación. Son recomendadas en suelos con textura media a fina.

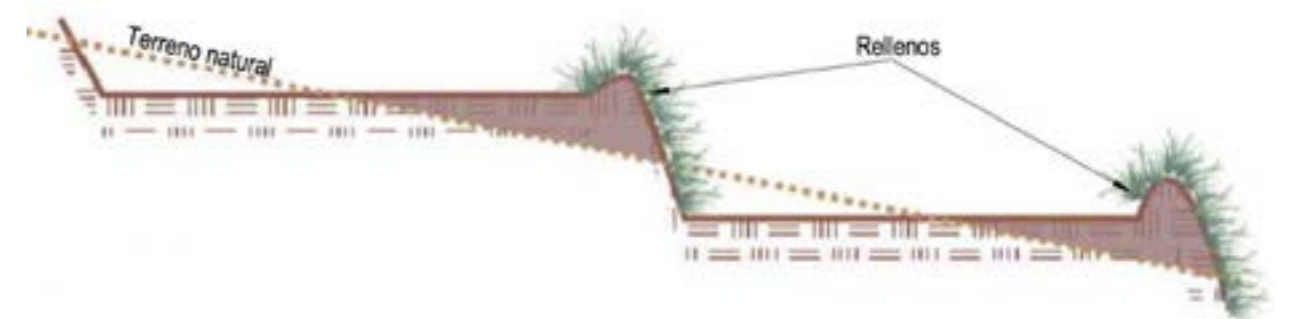
Figura 3.7
Esquema de una terraza de base angosta.



- Terrazas de banco.

Este sistema se construye en forma de bancos o escalones amplios. El bordo tiene un talud aguas abajo y debe ser protegido con vegetación permanente.

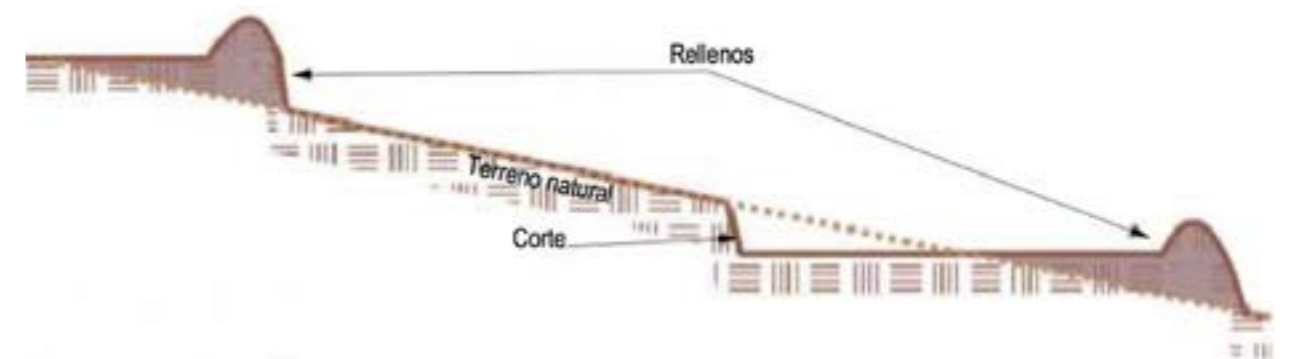
Figura 3.8
Esquema de una terraza de banco.



- Terrazas de canal amplio.

Este sistema alterna un área de siembra y un área de escurrimiento. Este sistema se recomienda en zonas áridas.

Figura 3.9
Esquema de una terraza de canal amplio.



En la construcción de terrazas, la vegetación juega un papel muy relevante para evitar la erosión ocasionada por la lluvia, ya que ésta ayuda a decrecer la energía de las gotas de lluvia y la velocidad del flujo del agua, y además puede filtrar químicos que se encuentran en los flujos de agua e incrementa la evapotranspiración. Para evitar la erosión del suelo es necesario mantener un alto porcentaje de cubierta vegetal (Figura 3.10), una densa red de raíces y un horizonte orgánico profundo en la superficie. Para evitar la erosión se debe: limitar la exposición del suelo, disminuir el área y tiempo en que el suelo permanece sin vegetación, mantener los sedimentos usando filtros y manejar los flujos de agua.

Figura 3.10
Ejemplo de estabilización de un corte a partir de terrazas y revegetación con tulias. Autopista México-Tuxpan, tramo Tejocotal-Nuevo Necaxa.



Fuente: Kerkus, S.A. de C.V.

Finalmente, el manejo del derecho de vía a partir de la construcción de terrazas representa un buen concepto de Infraestructura Verde Vial, y permite el manejo del paisaje y la conservación del suelo.

Figura 3.11
La fotografía de arriba muestra una ladera estabilizada al 20% de pendiente con el sistema que incluye dos tipos de plantas en Tlahuitoltepec, Oaxaca. Abajo, un ejemplo de terrazas anchas como sistema de control de erosión en China.



Fuente: Tomado de Torres-Zambrano et al., s.f. y <https://www.fao.org/news/story/es/item/231068/icode/>

3.1.3 Cunetas verdes

Las cunetas son canales que se ubican en los cortes, en uno o en ambos lados de la corona, contiguo a la línea de hombros, para drenar el agua que escurre por la corona y/o el talud. Las cunetas son canales o zanjas poco profundas ubicadas en los márgenes de las calzadas de la infraestructura vial.

Las cunetas pueden diseñarse y vegetarse para proporcionar un almacenamiento temporal de agua, permitir la filtración, evaporación y evapotranspiración. Con esta modificación se les denominan “cunetas verdes” y representan un conjunto de técnicas de drenaje urbano sostenible.

Figura 3.12
Ejemplos de cunetas: A) Cuneta convencional.
B) Cuneta verde con diferentes especies vegetales,
Seattle, Estados Unidos de América.



A)

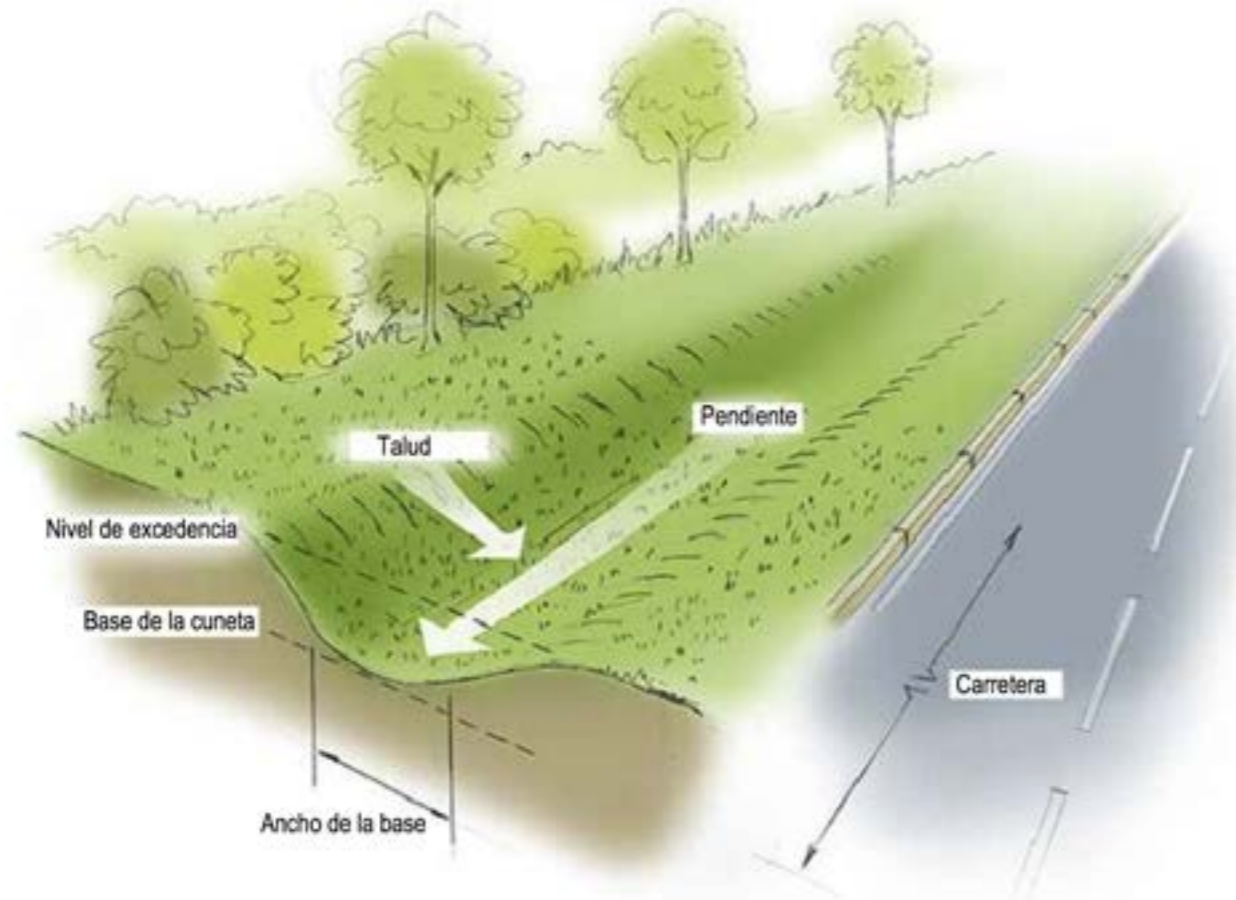


B)

Fuente: A) Tomado de <http://www.cementosinka.com.pe/blog/tipos-de-cunetas-el-drenaje-en-las-carreteras/> y
B) Tomado de <http://sudsostenible.com/fotogaleria-de-cunetas-verdes/>

En comparación con los sistemas convencionales de drenaje de carreteras, las cunetas verdes son más anchas y son más eficientes para los procesos de infiltración. Su diseño incluye gradientes pequeños (no mayores a 3°), tanto de pendientes transversales como de pendientes longitudinales (eje de la carretera), lo que favorece la baja velocidad de la escorrentía y así evita la erosión y facilita la infiltración y la sedimentación. Si lo que se quiere es fomentar la retención y el almacenamiento de agua, se pueden construir pequeñas presas de tierra que aseguren un tiempo de retención mayor. En zonas de protección de aguas subterráneas incluso se pueden sellar en su zona inferior, de manera que el canal vegetado se mantenga.

En el siguiente esquema se muestra un diagrama general de las partes que conforman una cuneta verde.

Figura 3.13**Elementos de una cuneta verde junto a un tramo carretero.**

Fuente: Modificado de <https://help.innovyze.com/display/XDH2016v1/Swale>

Por lo general, los canales no son adecuados cuando las carreteras están sobre terraplenes, a menos que éstos estén revestidos, ya que el agua que se infiltra podría causar problemas de estabilidad en el terraplén (Woods-Ballard *et al.*, 2015).

En general, estos sistemas de captación de agua son muy importantes y necesarios en las áreas con procesos de erosión de suelo muy avanzado. En este caso se deben diseñar cunetas que garanticen la reducción de la velocidad de los escurrimientos y permitan la infiltración del agua localmente. Las cunetas verdes reducen los costos de las infraestructuras, ya que eliminan los costos de instalación de bordillos y tuberías tradicionales.

Las cunetas son aplicables para muchos casos, ya que tienen diseños sencillos y económicos y normalmente acompañan a otro tipo de componentes de la Infraestructura Verde Vial. Las cunetas verdes se diferencian de las tradicionales por su abundante césped y una profundidad que permita contener el flujo de agua acorde a las necesidades del sitio, pero sobre todo, considerando la seguridad vial, las cu-

netas verdes secas o de infiltración (incluyen materiales permeables para infiltrar agua con buena calidad y su superficie no suele quedar mojada), las cunetas verdes húmedas (variedad en la cual el agua es retenida de manera constante) y las cunetas de biorretención (incluyen materiales para filtrar compuestos contaminantes o con altas concentraciones). En términos generales, la diferencia principal de estos diseños se basa en el manejo de los materiales de construcción, en este caso, el suelo que lo conforma, de tal manera que la velocidad de transferencia del agua colectada sea diferente.

De manera general, las más referidas son las cunetas secas o de infiltración y las cunetas húmedas, las cuales se describen con más detalle a continuación.

3.1.3.1 Cuneta seca o de infiltración

La cuneta seca es un canal que incluye en su diseño un lecho filtrante de suelo o sustrato preparado que se superpone a un sistema de drenaje inferior (Figura 3.14). Su principal función es filtrar todo el volumen de agua que llega al canal, por lo tanto, también se conocen como canales de transportación porque llevan la escorrentía a los sistemas de drenaje natural o desagües. El término “seco” se aplica porque la mayoría del tiempo no contienen agua y no llegan a encharcarse durante los periodos húmedos. Para que se lleve a cabo el drenaje subterráneo es necesario un tratamiento adicional y con capacidad de transporte debajo de la base de tal forma que se evite el encharcamiento.

El transporte de agua en estos sistemas es muy rápido, por lo tanto, existe el riesgo de que escurrimientos con cargas de contaminantes puedan transportarse rápidamente al acuífero, en este caso, es necesario introducir un revestimiento en la base. Este sistema de diseño de cunetas secas puede proporcionar un mayor flujo, capacidad de almacenamiento y/o captación de agua, un mejor rendimiento de interceptación, un menor riesgo de encharcamiento y menores áreas pantanosas en lugares donde las pendientes son planas y mejorando las condiciones para la infiltración (donde las condiciones del suelo lo permiten).

Las cunetas secas que poseen un drenaje subterráneo no necesitan tener un desagüe sobre el suelo (aunque esto generalmente se requiere para propósitos de manejo de flujo excedente) y, por lo tanto, pueden actuar como una longitud conectada de cuencas de retención. Su desempeño es complejo, ya que la altura relativa en cada canal que sirve al drenaje inferior definirá su desempeño hidráulico. Una incertidumbre adicional es que cuando el lecho alrededor del drenaje inferior tiene una permeabilidad relativamente baja, la capacidad del drenaje inferior en sí mismo puede no ser la condición limitante.

Figura 3.14
Cuneta seca con césped y plantas perennes.



Fuente: Tomado de https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2167&context=ing_ambiental_sanitaria

Se necesita un diseño cuidadoso de cada elemento para evaluar el rendimiento de un sistema y garantizar que los eventos hidrológicos de diseño se puedan tratar sin inundaciones aguas abajo. Los límites de velocidad para eventos regulares y extremos establecidos para los canales de transporte son relevantes aquí, pero como estos sistemas se adaptan mejor a áreas relativamente planas o longitudes cortas, la restricción de diseño es normalmente su rendimiento de transporte y almacenamiento, en lugar de la velocidad. Por lo general, el drenaje subterráneo debe de tener una capacidad de flujo de al menos 2 l/s/ha para garantizar que los sistemas puedan hacer frente a escenarios de eventos múltiples. Si la filtración hacia el desagüe inferior ocurriera más rápido que el límite de descarga requerido, entonces se requeriría de un control de flujo en este elemento.

3.1.3.2 Cuneta húmeda

Las cunetas húmedas están diseñadas específicamente para entregar condiciones húmedas y/o pantanosas en la base (Figura 3.15). Se pueden proponer cuando los sitios son muy llanos o planos y en donde los suelos tienen un mal drenaje (Woods-Ballard *et al.*, 2015). Su función principal es retener contaminantes o transformarlos para disminuir cargas o niveles de éstos al agua subterránea.

Cuando el sitio tiene características permeables, se propone utilizar revestimientos impermeables para brindar un rendimiento de tratamiento específico. Las cunetas húmedas ocurrirán naturalmente cuando los niveles freáticos se eleven por encima de la base de la cuneta, pero esto proporciona un vínculo hidráulico directo entre la escorrentía y el agua subterránea y normalmente no se debe permitir.

Una base de cuneta permanentemente húmeda puede proporcionar zonas de reposo para la eliminación de partículas finas, actuando como pequeños estanques o cuencas de infiltración.

Figura 3.15
Cuneta húmeda con césped y plantas resistentes a inundaciones.



Fuente: Tomado de <http://sudsostenible.com/cunetas-verdes-humedas-imagenes/>

Las características de diseño para brindar un buen desempeño en la remoción de contaminantes se encuentran ligadas al desempeño hidráulico. Se ha demostrado que las tasas de eliminación de la masa de contaminantes de las cunetas verdes húmedas son extremadamente variables, dependen de las concentraciones del contaminante en el influente (Bäckström *et al.*, 2006) y las propiedades del sustrato, pero generalmente son moderadas para la mayoría de los contaminantes (Barrett *et al.*, 1998; Deletic y Fletcher, 2006).

Los promedios de eliminación de contaminantes en las cunetas húmedas son del 76% para los sólidos en suspensión totales, 55% para el fósforo total y 50% para el nitrógeno total (Deletic y Fletcher, 2006). Asimismo, se han observado reducciones significativas en las concentraciones medias totales de zinc y cobre con un valor medio del 60%, pero los resultados han variado ampliamente (Barrett, 2008).

La remoción de contaminantes depende de factores específicos del sitio, tales como la pendiente, el tipo de suelo, la velocidad de infiltración, la longitud de la cuneta y la cubierta vegetal. En general, el mecanismo de eliminación de contaminantes predominante que opera en las cunetas es la infiltración a través del sustrato, en lugar de la filtración, porque los contaminantes atrapados en la superficie vegetada o las presas de contención no quedan absorbidos (Bäckström *et al.*, 2006).

Ventajas y desventajas de su construcción.

I. VENTAJAS (MODIFICADO DE BARTENS, 2009):

- Atrapan y eliminan sedimentos.
- Mejoran la calidad del agua mediante la filtración del suelo.
- Reducen la velocidad máxima de escorrentía y promueven la infiltración.
- Reducen la erosión.
- Tienen menor costo de construcción y mantenimiento respecto a los sistemas tradicionales de desalojo de aguas pluviales.
- Proporcionan recarga e infiltración de agua subterránea.

II. DESVENTAJAS:

- Una cuneta mal construida puede ocasionar fallas en el pavimento.
- No son aptas para áreas con pendientes grandes.
- Limitan las oportunidades de plantar árboles o arbustos altos.
- Riesgos de obstrucciones en las tuberías de conexión.

3.1.4 Franjas filtrantes

Las franjas filtrantes (Figura 3.16) son franjas o tiras de suelo con césped u otra vegetación densa en pendiente suave, nivelada y uniforme. Su función es crear una conexión entre la carretera y el medio circundante reduciendo la fuerza erosiva de la escorrentía de tal forma que se favorezcan los procesos de filtración de la descarga de sedimentos y del material grueso a través del césped o vegetación. Propician la sedimentación de las partículas y de los contaminantes arrastrados por el escurrimiento y la infiltración del agua en los suelos.

Se diseñan principalmente como tratamiento previo asociado con otra técnica de gestión de las aguas de escorrentía, ya que en las franjas filtrantes la escorrentía superficial fluye de forma laminar a través de éstas a velocidades suficientemente bajas para que los procesos de tratamiento puedan tener lugar de manera efectiva. A menudo se utilizan como un componente de pretratamiento antes de estructuras como galerías de infiltración, sistemas de biorretención y cunetas verdes (para prolongar la vida útil de estos componentes mediante la captura de sedimentos) o como componente de tratamiento (cuando la longitud del paso del flujo a través de la franja es suficiente).

Las franjas filtrantes no deben ubicarse en áreas donde los árboles o vegetación alta provoquen sombra y limiten el crecimiento del césped. Estos tipos de dispositivos se recomiendan en sitios con suelo pobremente drenado.

Figura 3.16
Franja filtrante a un costado de una carretera.



Fuente: Tomado de <https://www.naturalea.eu/>

Aunque se pueden usar en diversas situaciones, estos componentes de la Infraestructura Verde Vial son particularmente adecuados para manejar la escorrentía de las carreteras por su carácter lineal (Figura 3.16) y por su fácil construcción. Las franjas filtrantes también se utilizan en el control de la infiltración de las aguas pluviales en pasos a desnivel, puentes y taludes. También puede utilizarse como parte de una zona de amortiguamiento para proteger los arroyos de la escorrentía.

Ventajas y desventajas de su construcción.

I. VENTAJAS:

- Tecnología simple y de fácil construcción.
- Infiltración de aguas pluviales.

II. DESVENTAJAS:

- Obstrucción en la interfaz de la superficie impermeable/vegetación que perturba el flujo laminar.
- Paisajismo inadecuado, por ejemplo, falta de caída desde el borde de la superficie dura, nivelación inexacta que crea condiciones de erosión y estancamiento.

3.1.4.1 Jardín microcuenca

Los jardines microcuenca tienen el objetivo de retener y almacenar el agua, lo cual favorece el establecimiento de las plantas y el almacenamiento de carbono en el suelo, por lo que tienen un gran valor ecológico y paisajístico.

Son jardines con cavidades conformadas en el terreno para que alcancen un nivel inferior que el de las superficies adyacentes para captar agua de lluvia. Las microcuencas pueden construirse en espacios contenidos o extenderse longitudinalmente para formar canales o arroyos de retención e infiltración de agua pluvial.

Figura 3.17
Jardín microcuenca.



Fuente: Tomado de <http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.com/2020/11/jardines-de-lluvia-una-alternativa-de.html>

Es una técnica de bajo costo (cuando se lleva a cabo en obra vial nueva, el costo es equiparable al de construir arriates comunes), son de fácil construcción y no requieren de conocimiento técnico especializado, se pueden construir en prácticamente cualquier área permeable. Mediante el diseño adecuado de un conjunto de microcuencas se pueden crear juegos topográficos de atractivo paisajístico.

Ventajas y desventajas de su construcción.

I. VENTAJAS:

- Eliminación parcial de los sedimentos y contaminantes transportados por la escorrentía de aguas pluviales urbanas y rurales.
- Son una opción efectiva como pretratamiento, puesto que retienen contaminantes antes de hacer pasar el agua a otra práctica de gestión de la escorrentía urbana o rural.
- Promueven el aumento de la infiltración de las aguas de escorrentía y, por tanto, disminuyen ligeramente los caudales en superficie.
- Son relativamente baratas y sencillas de diseñar, construir y fáciles de mantener.
- Añaden un toque estético visualmente atractivo, sobre todo en estacionamientos y carreteras, que no suelen ser espacios atractivos.

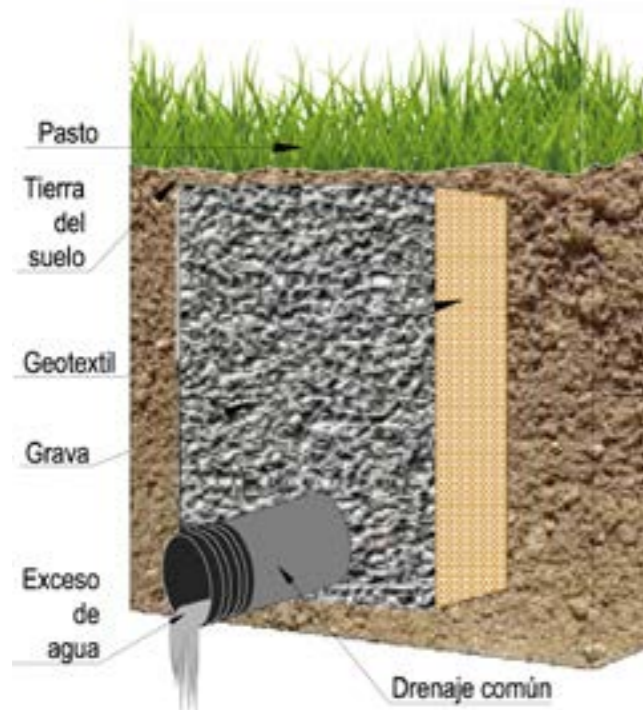
II. DESVENTAJAS:

- A diferencia de las cunetas verdes, se requiere de una mayor área y ésta no puede considerarse para el tránsito (acotamientos o tránsito peatonal).
- No son aptas para terrenos empinados.
- No son aptas para el drenaje de escorrentías cargadas de contaminación a menos que se evite la infiltración.
- No son de utilidad para la reducción significativa de caudales extremos.

3.1.5 Drenes filtrantes

Los drenes filtrantes son ubicados en zanjas poco profundas, que están llenas de piedra/grava para crear un almacenamiento subterráneo temporal para la atenuación, transporte y filtración de la escorrentía de agua superficial (Woods-Ballard *et al.*, 2015). La grava puede estar contenida en una simple zanja o puede estar revestida con un geotextil, geomembrana u otro revestimiento impermeable. Además, las zanjas pueden contar con un tubo que funcione como dren para facilitar la circulación del agua en su interior. Dependiendo de la ubicación del tubo, los drenes filtrantes son también conocidos como drenes franceses, los cuales se han utilizado durante varios años en el drenaje de carreteras para la captación y drenaje de aguas superficiales (Figura 3.18). Idealmente, los drenes filtrantes deben recibir el flujo lateral de una superficie impermeable adyacente, que se pretrata con una franja filtrante con vegetación o equivalente.

Figura 3.18
Esquema de un dren filtrante.



Fuente: Modificada de Woods-Ballard et al., 2015.

Los drenes filtrantes con geotextiles pueden ayudar a reducir los niveles de contaminantes de la escorrentía al filtrar los sedimentos finos, metales, hidrocarburos y otros contaminantes comunes en la infraestructura vial. Si las características del suelo *in situ* lo permiten, también pueden favorecer los procesos de adsorción y biodegradación. Con una protección estructural adecuada, los geotextiles o geomembranas se pueden usar como una alternativa a las piedras o gravillas donde el componente está diseñado principalmente para el transporte.

Los drenes filtrantes pueden reemplazar las tuberías convencionales como sistemas de transporte de agua y pueden eliminar la necesidad de bordos y cunetas cuando los sistemas están ubicados en caminos o carreteras. Los drenes filtrantes funcionan mejor cuando se incorporan a un tren

de tratamiento junto con otros componentes o sistemas de drenaje sustentable para el tratamiento y almacenamiento de los flujos, especialmente en eventos de tormentas extremas.

Se ubican mejor junto a superficies impermeables como carreteras con sistemas de pretratamiento aguas arriba. A menos que se incluya en el diseño un pretratamiento eficaz de los sedimentos, éstos son aplicables principalmente a áreas impermeables donde no hay altos niveles de partículas en la escorrentía. Pueden incorporarse de manera efectiva en el paisaje y en espacios públicos abiertos. Con un diseño cuidadoso pueden tener requisitos mínimos.

En términos de pendiente, el uso de drenes filtrantes generalmente se restringe a sitios con pendiente longitudinal menor al 2%, con estas condiciones el agua puede transportarse lentamente a través del medio filtrante y así favorece los procesos de remoción de contaminantes. No deben ubicarse en un suelo inestable por lo que en la etapa de diseño es necesario verificar las condiciones del suelo y las aguas subterráneas del sitio. Los drenes están diseñados para un flujo intermitente y se debe permitir que se escurran y ventilen entre eventos de lluvia. Por lo tanto, no deben usarse en sitios con un flujo continuo.

Los drenes pueden resultar un componente útil de gestión de aguas superficiales en sitios donde los sistemas con vegetación no son prácticos. Podrían construirse debajo de una superficie impermeable, siempre que se incluya suficiente acceso para inspección y mantenimiento.

Ventajas y desventajas de su construcción.

I. VENTAJAS:

- Reducen el volumen de escorrentía y el caudal pico.
- Son económicos y sencillos de construir.
- Mejoran la calidad de la escorrentía y preservan el equilibrio natural del agua en su entorno.
- Pueden servir como mecanismo de riego pasivo para el arbolado o vegetación de las áreas adyacentes.
- Ayudan a distribuir el área de infiltración, por lo que reduce el impacto de las áreas poco permeables.
- Se incorporan fácilmente al paisaje y son ideales para carreteras.

II. DESVENTAJAS:

- En carreteras muy transitadas, esta infraestructura puede necesitar un mantenimiento frecuente.
- Están restringidos a lugares con elevada permeabilidad, sin altas cargas de finos (para evitar colmatación) y distancia al nivel freático > 1 m.
- No puede circular tráfico sobre el sistema, a no ser que haya sido diseñado con la capacidad portante suficiente.
- Es difícil detectar la contaminación y colmatación de los materiales granulares del fondo cuando no se ha previsto un filtro más superficial.
- Si no se realiza un mantenimiento adecuado, el riesgo de obstrucción y bloqueo puede aumentar el riesgo de inundación por agua superficial y también de entrada de agua a la construcción del pavimento de la carretera.
- Existe el riesgo de que las piedras del dren caigan en los desagües.

3.1.6 Estanques y humedales

El término "humedal" se utiliza para describir cuerpos de agua con proporciones más grandes y, a diferencia de los estanques, están cubiertos por vegetación acuática, además, tienden a tener mayores variaciones de profundidad y pueden incluir islas poco profundas. Estos sistemas se construyen para tratar aguas pluviales emulando un humedal natural.

Los humedales naturales a menudo se denominan "riñones de la naturaleza" debido a su capacidad para remover contaminantes a través de procesos de absorción, filtración, sedimentación, volatilización, intercambio iónico y descomposición biológica, por lo tanto, los "humedales de aguas pluviales" son diseñados para remover contaminantes y al mismo tiempo regular las aguas pluviales. Los humedales generalmente se extienden a gran escala y requieren vegetación tanto acuática como ribereña para tratar eficazmente las aguas pluviales.

Como componentes de la Infraestructura Verde Vial se plantean sistemas de filtración tales como estanques, humedales y celdas de biorretención. Los estanques consisten en embalses superficiales poco profundos con una lámina de agua permanente que proporciona tanto atenuación como tratamiento de la escorrentía de aguas superficiales. Pueden soportar vegetación acuática emergente, lo que ayuda a mejorar los procesos de tratamiento y tiene beneficios de amenidad y biodiversidad. Una celda de biorretención está basada en el diseño de una cuneta húmeda o puede ubicarse en una depresión del paisaje en donde se favorezca la retención de agua y se establezca el hábitat para la vegetación resistente en las condiciones de inundación. Su diseño depende de las limitaciones específicas del sitio, por ejemplo, los suelos subyacentes, la vegetación existente. No se recomienda ubicar estas estructuras en áreas con pendientes mayores a 5 por ciento.

Los estanques y humedales siempre deben diseñarse con sistemas adecuados de pretratamiento aguas arriba (franjas filtrantes, o barreras de sedimentación). Esto evita el azolve por sedimentación y que pierdan su atracción estética y, además, reduce los costos de mantenimiento. Los estanques y humedales desempeñan una función valiosa en la sedimentación de partículas finas residuales o fundamentalmente en la etapa final de remoción de partículas que arriban en la escorrentía de aguas superficiales antes de la descarga.

Estos sistemas de filtración y remoción de contaminantes son componentes de la Infraestructura Verde Vial que, bien diseñados y con buen mantenimiento, pueden brindar otros beneficios tales como sostén de la vida silvestre y de vegetación endémica. Los estanques pueden diseñarse con características naturales, con pendientes laterales poco profundas y con césped (Figura 3.19), y desde un punto de vista paisajístico brindan modificaciones estéticas, principalmente en lugares muy perturbados, de tal forma que pueden agregar un valor económico significativo a un sitio. La aceptabilidad pública de los estanques depende en gran medida de su calidad estética, de su integración efectiva dentro del paisaje y de su desempeño como recurso comunitario, por lo que su forma, disposición y plantación generalmente deben ser diseñados y especificados por arquitectos paisajistas con experiencia.

Figura 3.19
Imágenes de humedales pluviales.



Fuente: Tomado de <https://www.archdaily.mx/mx/02-309271/qunli-parque-de-humedales-y-aguas-lluvias-turenc>

Se pueden crear estanques y humedales utilizando una depresión natural existente, excavando una nueva depresión o construyendo terraplenes. Los cuerpos de agua naturales existentes no deben utilizarse como un medio para eliminar la escorrentía de aguas superficiales, cuando hay eventos que generen un alto riesgo de contaminación o una mala calidad del agua.

Ventajas y desventajas de su construcción.

I. VENTAJAS:

- Adecuados para todos los eventos de lluvia.
- Buena capacidad de eliminación de contaminantes de escorrentía urbana.
- Adecuados donde el agua subterránea es vulnerable (al colocar revestimiento del fondo).
- Brindan beneficios ecológicos, estéticos y de esparcimiento.

II. DESVENTAJAS:

- Potencial para condiciones anaeróbicas.
- La propiedad de la tierra puede limitar el uso en áreas de mayor densidad.
- Pueden no ser adecuados para pendientes pronunciadas porque el diseño requiere terraplenes altos, y el riesgo para la salud y la seguridad percibido puede llevar a la instalación de cercas y el aislamiento del estanque.
- La colonización por vegetación invasora puede llevar a una mayor necesidad de mantenimiento.

3.1.7 Cuencas de retención

Las cuencas de retención son sistemas de drenaje sustentable que consisten en depresiones ajardinadas que normalmente están secas, excepto durante e inmediatamente después de una tormenta. El principal objetivo es regular eventos de lluvias extraordinarias y así evitar inundaciones y daños a la infraestructura vial u otros componentes de la Infraestructura Verde Vial. Algunas de sus funciones son similares a las de estanques, humedales y celdas de biorretención, sin embargo, las cuencas de retención cumplen con el servicio de almacenar agua para contener excesos de ésta en eventos intensos de lluvia y muchas veces no permiten la infiltración, a diferencia de estanques y humedales.

Pueden implementarse de forma complementaria a otra estructura de la Infraestructura Verde Vial, donde la escorrentía superficial de eventos regulares se encamina a través de la cuenca cuando los flujos aumentan. Debido a que la salida está restringida, la cuenca se llena y proporciona almacenamiento de escorrentía y atenuación del flujo. También pueden ser componentes fuera del derecho de vía hacia donde se desvía la escorrentía, una vez que los flujos alcanzan un umbral específico.

Las cuencas de retención pueden ser depresiones con vegetación o áreas de almacenamiento de agua en terrenos descubiertos (que no tienden a proporcionar ningún

tratamiento y normalmente se diseñan como componentes fuera del derecho de vía). Cuando la cuenca tiene vegetación, la superficie del suelo puede absorber algo de escorrentía, por lo que puede usarse para apoyar la prevención de escorrentía del sitio para pequeños eventos de lluvia (intercepción), siempre que pequeñas cantidades de infiltración no representen un riesgo para las aguas subterráneas.

Desde un punto de vista de calidad del agua, los principales beneficios de las cuencas de retención con vegetación están asociados con la remoción de sedimentos y materiales flotantes. También los niveles de nutrientes, metales pesados, materiales tóxicos y materiales que demandan oxígeno pueden reducirse significativamente. Estos beneficios aumentan a medida que se alarga el tiempo de retención para un evento. Cuando se diseña apropiadamente, una parte o toda el área de la cuenca también se puede usar como una instalación recreativa.

Cuando no hay un tratamiento previo aguas arriba, las cuencas de retención en línea deben incluir una bahía de carga para tratar de contener la acumulación de sedimentos, aunque esto puede resultar en áreas inutilizables y poco atractivas que pueden no ser aceptables para espacios abiertos públicos, pero sí ideales para carreteras y vías férreas.

Figura 3.20
Cuenca de retención a un costado de la carretera, Qunli, China.



Fuente: Tomado de https://www.archdaily.mx/mx/02-309271/qunli-parque-de-humedales-y-aguas-lluvias-turenscape?ad_medium=gallery

Las cuencas de retención generalmente se aplican a diferentes tipos de desarrollo y se pueden usar tanto en áreas residenciales como no residenciales. Son apropiadas para su uso en situaciones de modernización de carreteras (donde los niveles de la red de drenaje existente y la disponibilidad de terreno lo permitan) donde ya se conocen los volúmenes de excedencia y la longitud del derecho de vía.

Ventajas y desventajas de su construcción.

I. VENTAJAS:

- Adecuadas para una amplia gama de precipitaciones.
- Se pueden utilizar sobre aguas subterráneas vulnerables (si están revestidas).
- Simples de diseñar y construir.
- Fácil mantenimiento.
- Captura segura y visible de derrames.
- Potencial de uso dual de la tierra.

II. DESVENTAJAS.

- Pequeña reducción del volumen de escorrentía.
- Profundidad de detención limitada por los niveles de entrada y salida.

3.1.8 Pozos de infiltración

Los pozos de infiltración pueden ser pozos de recarga someros, para el almacenamiento y recuperación de acuíferos (denominados ASR) y los pozos de transferencia y recuperación de almacenamiento de acuíferos (denominados ASTR). La infiltración, el almacenamiento y la recuperación de agua en infraestructura de carretera y vías férreas puede resultar más rentable en comparación con otras alternativas de almacenamiento que requieren grandes áreas para este fin (p. ej. humedales y cuencas de infiltración) o tecnologías que requieren la construcción de plantas de tratamiento de agua o depósitos de superficie.

Los pozos someros de infiltración se utilizan para acuíferos con niveles freáticos someros o en lugares donde las capas superficiales del terreno son de baja permeabilidad y por debajo existen materiales permeables, lo que implica no utilizar técnicas de distribución. Los pozos someros se construyen dentro de un estanque de infiltración, una franja de infiltración o en el interior de un cauce natural y contribuyen a mejorar la eficiencia y el rendimiento de las demás infraestructuras verdes.

En zonas áridas y semiáridas se utiliza cada vez más la construcción de pozos de infiltración secos, que constan de pozos someros que penetran en la zona no saturada y su función es infiltrar agua de lluvia colectada en las áreas o infraestructuras verdes (parques, andadores, camellones) que no tienen un grado de contaminación. Los pozos se colocan en depresiones naturales o se interconectan a un sistema de recolección; el agua de lluvia es filtrada en un desarenador y el efluente se infiltra dentro del pozo seco (Mendoza-Cázares, 2018).

La técnica de almacenamiento del agua en pozos para el almacenamiento y recuperación de acuíferos, ASR, considera el almacenamiento de agua en el acuífero utilizando un pozo para la introducción y recuperación de agua NORMA Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2007. Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada: La técnica se aplica en zonas donde existen horizontes gruesos de baja permeabilidad que yacen sobre el acuífero por recargar. La técnica utiliza un pozo para recargar y extraer el agua, su desventaja radica en el punto de extracción, ya que el agua recuperada puede estar influenciada por la química del agua que originalmente se inyectó (Maliva y Missimer, 2010).

Los pozos de transferencia y recuperación de almacenamiento del agua en un acuífero consisten en la inyección de agua a un pozo y la posterior extracción en otro pozo ubicado a una distancia razonable para incrementar el tiempo de viaje del agua en el acuífero. La técnica ofrece un beneficio de depuración del agua al pasar por los estratos permeables del acuífero (Mendoza-Cázares, 2018), y su planificación y diseño cuidadoso son esenciales para desarrollar una configuración de pozos de infiltración exitosa. La disponibilidad de agua, la demanda de agua y las características del agua de origen guían el diseño inicial y el tipo de sistema de pozos que se construirá. Además, la evaluación tanto de las condiciones hidrológicas del acuífero como de los parámetros operativos es esencial para determinar la viabilidad.

La técnica ASTR ha sido también utilizada en la protección de los acuíferos para formar una barrera hidráulica que se consigue al inyectar agua al subsuelo a través de uno o varios pozos ubicados próximos a la zona costera. Una vez realizada la inyección se procede a la extracción del agua subterránea en otro pozo, ubicado tierra adentro. El efecto conjunto de los pozos de inyección/extracción (I/E) produce un traslape de la zona de influencia de cada pareja, propiciando que la trayectoria de una partícula sea modificada en su dirección, teniendo como consecuencia la ampliación de la zona de influencia de cada pareja I/E. El efecto conjunto de los pozos I/E equilibra el avance del frente salino. La forma de los conos I/E depende del gasto de extracción, del espaciamiento entre los pozos I/E, de las propiedades hidráulicas del acuífero y del flujo regional. Este tipo de aplicaciones permite la remediación del agua subterránea (Ponsin *et al.*, 2014) y la caracterización de parámetros hidráulicos y de transporte (Burbery *et al.*, 2013). Esta técnica es ideal para carreteras construidas cerca de las zonas costeras, donde la intrusión salina al acuífero esté detectada.

Ventajas y desventajas de su construcción.

I. VENTAJAS:

- No hay pérdidas por evaporación.
- No hay pérdida de áreas y tierras productivas.
- Tienen bajos costos de instalación (para los pozos someros).
- Un costo de mantenimiento es menor en comparación con otro tipo de infraestructuras superficiales.
- Debido a la creciente demanda de agua potable, es más sencillo encontrar lugares donde sea factible la infiltración y recarga de acuíferos en comparación con lugares idóneos para la instalación de presas o cuerpos de agua superficiales.

- La instalación de pozos es escalable, lo que permite su implementación por etapas.

II. DESVENTAJAS:

- El agua de infiltración puede modificar la química del agua de los acuíferos.
- La sedimentación ocasiona una disminución en la capacidad de infiltración.
- Necesitan un constante monitoreo de la calidad del agua que se almacena y se infiltra al acuífero.

3.2 Componentes de la Infraestructura Verde Vial que brindan servicios ambientales

3.2.1 Reducción de gases de efecto invernadero (energías renovables)

Pese a que México cuenta con un gran potencial en la utilización de energías limpias, pocos han sido los esfuerzos y los ejemplos en el uso de la energía solar y eólica en la infraestructura vial a modo de reducir su huella de carbono.

En México, la red de carreteras presenta un enorme potencial en la utilización de energías limpias, especialmente la energía solar y la energía eólica. Las autopistas presentan un mayor potencial, debido a que en muchas de ellas se tienen espacios centrales que pueden ser utilizados para instalación de sistemas fotovoltaicos y de turbinas eléctricas de baja potencia. La energía eléctrica generada puede ser utilizada para la iluminación de la Infraestructura Verde Vial y sus señalamientos.

La infraestructura ferroviaria, por otro lado, requiere de señalamientos en sus cruces con carreteras, los cuales pueden ser alimentados con sistemas aislados de energías limpias. La utilización de energía solar o eólica para el suministro de energía eléctrica en este tipo de señalamiento se ve muy prometedora, además de que puede ayudar a evitar la instalación de una red eléctrica exclusiva mediante la instalación de un sistema aislado, reduciendo los costos de su implementación.

Debido a que gran parte del transporte ferroviario trabaja con diésel, no hay muchas oportunidades de suministrar la energía requerida con energías limpias. Sin embargo, en los sistemas ferroviarios eléctricos sí existe la posibilidad de que dispongan de instalaciones de energía solar o eólica para su abastecimiento de energía.

Asimismo, cuando se estén realizando obras de reparación o mantenimiento se pueden utilizar sistemas móviles autónomos de señalamiento basados en un sistema solar fotovoltaico, que puede cargar su energía durante el día y funcionar por la noche guiando a los usuarios.

En este sentido, a continuación se presentan sistemas de energía renovable que permiten reducir la emisión de gases de efecto invernadero de una Infraestructura Verde Vial por el uso de combustible fósil en el suministro de energía eléctrica.

3.2.1.1 Energía solar

La energía solar es la que llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta principalmente) procedente del Sol, donde ha sido generada por un proceso de fusión nuclear. El aprovechamiento de la energía solar se puede realizar de dos formas: por conversión térmica de alta temperatura (sistema fototérmico) y por conversión fotovoltaica. Mediante paneles solares es posible capturar los fotones que llegan desde el Sol y éstos, mediante los colectores solares, son transformados en energía eléctrica. Las zonas más preciadas para la instalación de colectores solares son aquellas en las cuales la radiación solar es más intensa y que cuentan con la mayor parte de días sin nubosidad.

Los sistemas fotovoltaicos aislados de la red eléctrica se han convertido en una fuente de energía insustituible para muchas personas en su vida cotidiana. Estos sistemas se encuentran en señales de tráfico, letreros luminosos de carretera, etc. Pero el desarrollo de mayor impacto de esta fuente de energía se encuentra sin lugar a duda en el ámbito rural o en emplazamientos aislados y/o remotos, cuyo servicio de abastecimiento eléctrico es muchas veces muy costoso o simplemente no existe.

En las instalaciones fotovoltaicas aisladas, lo habitual es utilizar un conjunto de baterías que almacenan la energía eléctrica generada durante las horas de radiación solar para su utilización posterior en los momentos de baja o nula insolación. Hay que destacar que la fiabilidad de la instalación global de electrificación depende en gran medida del sistema de acumulación. La capacidad de una batería es la capacidad máxima de electricidad que puede acumularse para su posterior descarga.

Un sistema fotovoltaico conectado a una red es un sistema que trabaja de manera conjunta a una red eléctrica pública y a la generación de energía de los paneles solares. Dichos sistemas, además de reducir emisiones de gases de efecto invernadero, permiten una confiabilidad para el consumo de energía eléctrica limpia. La tecnología es de relativa fácil implementación y se encuentra disponible de manera comercial con factibilidad de refacciones y mantenimientos, elemento importante para su operación en el mediano y largo plazo.

La vida útil de los paneles fotovoltaicos supera los 30 años, sin embargo, algunos elementos como los inversores y banco de baterías deben ser remplazados en un lapso promedio de 10 años¹³, si y solamente si, los mantenimientos preventivos han existido, de lo contrario, dicho tiempo se puede ver reducido considerablemente. También es importante una buena y adecuada instalación que facilite la mayor vida útil de los mismos. Existen diversos proveedores nacionales de la tecnología, así como implementadores que pueden coadyuvar en la vida útil del proyecto. Es frecuente encontrar, de manera comercial, empresas que ofrecen pólizas de mantenimiento que ayudan a alargar la vida del proyecto.

Las instalaciones solares para la generación de energía en las carreteras o vías férreas pueden situarse a un lado de éstas, como se muestra en la Figura 3.21 A y B. Deberán estar orientadas al sur, puede existir vegetación en el lado norte, pero no a los costados este, oeste y sur, ya que pueden generar sombra.

¹³ La vida media de los inversores es de 10 años. La mayoría de los fabricantes los garantizan por 5 años. Por lo tanto, para un sistema fotovoltaico que se supone que va a producir durante 30 años, cambiará el inversor central de 3 a 4 veces en promedio.

Figura 3.21**Ejemplos de paneles solares instalados en carreteras.****A) Sistema de paneles solares instalados con eje paralelo a la carretera.****B) Iluminación de una carretera mediante sistema de paneles solares.**

A)



B)

Fuente: A) Tomado de <https://forococheelectricos.com>B) Tomado de <https://ssmartcity.com/cuantos-paneles-solares-necesito-para-mi-casa/>

Los sistemas de energía solar de baja y mediana escala permiten abastecer las necesidades de los usuarios en el sitio en que se genera, a esto se le conoce como generación distribuida y tiene muchas ventajas, una de las principales es reducir las pérdidas por transmisión. La generación distribuida con paneles solares es conveniente para los entornos urbanos y son sistemas conectados a la red eléctrica, lo que los hace más económicos. También son recomendados en zonas aisladas que requieran energía eléctrica, estos sistemas requieren de un banco de baterías para su almacenamiento y su costo se incrementa por el uso de las baterías. Aun así, suelen ser económicamente rentables. Todos los componentes de los sistemas fotovoltaicos deben ser de alta calidad, fáciles de ensamblar y accesibles. En este sentido, los diseños complicados y los tiempos de entrega escalonados pueden crear dificultades y aumentar los costos generales.

Ventajas y desventajas de su construcción.

I. VENTAJAS:

- Fuente de energía limpia y renovable.
- Generación de energía próxima a los puntos de consumo.
- Versatilidad de aplicaciones y ubicaciones, ligada al autoconsumo, con posibilidad de integración en sistemas híbridos.
- Accesibilidad tecnológica al usuario final, facilidad de transporte de equipamientos y montaje.
- Suministro de electricidad en lugares aislados y alejados de la red eléctrica.
- Bajo costo de operación y mantenimiento y elevada fiabilidad.
- A largo plazo, se puede hablar de un alto retorno de inversión por la gran cantidad de energía que pueden generar.

II. DESVENTAJAS:

- Ocupan mucho espacio.
- La inversión inicial es alta.
- La producción eléctrica no es continua.
- El almacenamiento de energía es costoso.
- Los paneles solares tienen baja eficiencia en comparación con otras tecnologías.

3.2.1.2 Energía eólica

La energía eólica es la energía obtenida a partir del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es convertida en otras formas útiles de energía para las actividades humanas. El principal medio para obtenerla son los aerogeneradores o turbinas eólicas, "molinos de viento" de tamaño variable que transforman con sus aspas la energía cinética del viento en energía mecánica.

Las pequeñas turbinas eólicas son máquinas que ofrecen una potencia nominal comprendida entre 50 W y 500 kW. Existen dos tipologías en el sector de las eólicas, las de eje horizontal y las de eje vertical, que no requieren ser orientadas al viento (Figura 3.22).

Figura 3.22
Turbinas eólicas de eje horizontal y eje vertical.



Fuente: Tomado de Bueno-López, 2015.

Las eólicas de eje horizontal son las más comunes y las que se utilizan en grandes potencias. Normalmente disponen de tres palas, pero en modelos de pequeñas potencias pueden disponer de dos, cuatro o cinco. La principal ventaja de este tipo de sistema es su alto rendimiento y su inconveniente reside en su variación de eficacia causada por vientos fuertes.

Las eólicas de eje vertical disponen de multitud de variantes y configuraciones y son normalmente usadas en zonas urbanas, ya que pueden utilizar masas de aire provenientes de todas las direcciones y de forma instantánea. La principal ventaja de este tipo de tecnología es la de funcionar con casi cualquier tipo de viento y su principal inconveniente es su limitada eficacia.

El viento en las eólicas de eje horizontal hace girar las palas alrededor del eje, transmitiendo esa energía mecánica al generador a través del árbol de transmisión. Este componente es una caja de cambio que en vientos de poca magnitud multiplica con engranes la velocidad de rotación y con vientos fuertes la frena, garantizando un régimen de funcionamiento constante. En el caso de mini y micro eólicas este elemento no existe, quedando unidos el eje y el generador. Esta rotación de la hélice (conjunto palas y eje) conlleva la producción de electricidad en el generador.

Los principales elementos que componen una instalación eólica de pequeña potencia son los que a continuación se enumeran:

Tabla 3.1
Elementos que componen una instalación eólica de pequeña potencia.

Elemento	Función
Aerogenerador	Transforma la energía del viento en energía eléctrica.
Inversor	Transforma la corriente continua en energía eléctrica alterna.
Regulador	Controla la generación eléctrica del aerogenerador y el estado de la batería.
Batería	Se encarga de almacenar la energía generada para su uso posterior.

Figura 3.23
Principales componentes de un sistema eólico.



Fuente: Tomado de Bueno-López, 2015

En la actualidad existen numerosos ejemplos de la implementación de sistemas de energía eólica para abastecer a proyectos de carreteras. En la Figura 3.24 A y B se muestran ejemplos de la aplicación de la energía eólica en carreteras con turbinas eólicas tipo Gorlov, desarrolladas en Estados Unidos de América.

Figura 3.24

En las fotografías se muestran ejemplos de sistemas eólicos que pueden ser instalados en carreteras. A) Turbina eólica savonius horizontal.

B) Turbina eólica vertical tipo Darrieus-Savonius mixto (Hi-VAWT DS-1500) en Taiwán.



A)



B)

Fuente: Tomado de <https://ecosistemaurbano.org/investigaciones/energia-eolica-en-las-autopistas-windfreeways/> y <https://www.tecnocarreteras.es/2011/05/04/aprovechando-el-movimiento-de-los-coches-para-generar-energia-eolica/>

Otra consideración para tener en cuenta es que en grandes instalaciones y parques eólicos la inversión por kilowatt es generalmente 5 veces menor que la de las pequeñas instalaciones y su rendimiento de producción es mayor, implicando tiempos de retorno interesantes, así como un costo de producción relativamente bajo. Sin embargo, las eólicas de pequeña potencia, en pocas ocasiones superan las 1000 horas de uso por año, y el costo de la inversión en esos tamaños hacen que las rentabilidades de las inversiones superen los 8 años de tiempo de retorno, limitando el uso de esas tecnologías a casos concretos de necesidad de suministro eléctrico en zonas aisladas y no como fuente de mejora energética rentable.

Es importante hacer mención que la infraestructura vial no es un sistema grande de consumidores de energía para su operación, por lo que los grandes parques eólicos no representan una opción para el suministro de energía, además de que la implementación de un parque eólico de gran escala requiere de permisos y estudios especiales. A diferencia de la eólica de baja escala, cuya implementación es más sencilla.

Ventajas y desventajas de su construcción.

I. VENTAJAS:

- Generación de energía próxima a los puntos de consumo.
- Versatilidad de aplicaciones y ubicaciones, con posibilidad de integración en sistemas híbridos.
- Accesibilidad tecnológica al usuario final, facilidad de transporte de equipamientos y montaje.
- Funcionamiento con vientos moderados, sin requerir complejos estudios de viabilidad.
- Aprovechamiento de pequeños emplazamientos o de terrenos con orografías complejas.
- Suministro de electricidad en lugares aislados y alejados de la red eléctrica.
- Bajo costo de operación y mantenimiento y elevada fiabilidad.
- Reducido impacto ambiental, por menor tamaño e impacto visual, y por su integración en entornos con actividad humana.
- Energía rentable en sitios de fuertes vientos.

II. DESVENTAJAS:

- Contaminación visual y sonora.
- La producción eléctrica no es continua y depende ampliamente de las condiciones climatológicas.
- Dependencia de los sistemas de almacenamiento como son las baterías.
- Riesgo de colisiones con fauna (p. ej. con aves) con las palas.
- Si los vientos no son constantes, incluso en bajas velocidades, la generación puede ser muy pobre.

- Hay que tener en cuenta que el rendimiento de las turbinas es diferente según la naturaleza del viento, y en algunos casos las eólicas pierden una gran parte de su eficacia en caso de turbulencias.

3.2.2 Reducción del ruido

3.2.2.1 Barreras acústicas

Las barreras acústicas son componentes de la Infraestructura Verde Vial que tienen como finalidad reducir el ruido producido por la infraestructura vial mediante el uso de pavimentos, mamparas o barreras naturales que disminuyan las emisiones sonoras.

El sonido se desplaza como una onda a través de medios tales como el aire, líquido y plasma. En el aire, la velocidad a la que viajan las ondas se determina por las condiciones atmosféricas, por lo que la velocidad del sonido puede variar dependiendo de la temperatura.

El ruido producido por el tráfico en carreteras es causado principalmente por las llantas, motores y tubos de escape de los autos y camiones. El nivel del ruido de tráfico puede ser medido con un sonómetro y existe normatividad mexicana para la medición de ruido de fuentes fijas; visualizando una carretera como una “fuente fija”. La intensidad del ruido dependerá del número y la velocidad de los automóviles, la inclinación del terreno próximo y la distancia entre la autopista y las personas que los escuchan.

No todos los sonidos pueden ser percibidos por el oído humano, al medir los niveles de sonido, los medidores adaptan las frecuencias altas y bajas del sonido de tráfico a los niveles percibidos por la mayoría de la población. Este ajuste es conocido como “A-weighting” (Ajuste de decibelios) y se expresa así “dBA”. Adicionalmente, los niveles del sonido de tráfico no son constantes debido al cambio en el número, tipo y velocidad de los vehículos. Por eso, en la medición de ruido por tránsito vehicular se utiliza un valor simple para expresar el promedio o nivel equivalente de sonido o “Leq” que se calcula a partir de expresiones matemáticas a partir de los dBA medidos.

El ruido generado por el tránsito vehicular es uno de los factores que mayores impactos ecológicos causa a la fauna, ya que produce varios efectos como el desplazamiento, reducción de áreas de actividad y un bajo éxito reproductivo, lo que está asociado a pérdida del oído, aumento de las hormonas del estrés, comportamientos alterados e interferencias en la comunicación durante la época reproductiva, entre otros (Forman y Alexander, 1998). En este sentido, resulta hasta cierto punto importante intentar reducir las molestias causadas a los animales derivadas del ruido de los vehículos que circulan por la infraestructura. No obstante, algunas de las medidas de mitigación que se implementan para reducirlo también generan impactos ambientales derivados de la fragmentación del hábitat, por ejemplo, los apantallamientos opacos que, si bien contribuyen a minimizarlo, también generan fragmentación del hábitat y es por ello que deben ir acompañados del estudio de conectividad y de la construcción de pasos para fauna para disminuir su afectación.

La instalación de barreras acústicas tiene como finalidad reducir los niveles de ruido que parten del foco emisor y llegan al foco receptor, en función de diversas variables.

Normalmente las pantallas acústicas se instalan en los tramos de infraestructura vial que cruzan áreas urbanas; pero también suelen aplicarse en espacios naturales, especialmente en marismas en los que nidifican aves de especial interés.

Se puede hablar de pantallas opacas y transparentes, pero estas últimas no están recomendadas de aplicar ya que generalmente se construyen con el objetivo de no impactar al paisaje, pero acarrear mayor riesgo de accidentes para las aves, ya que no reconocen la pantalla como un obstáculo, sobre todo cuando la vegetación natural se puede ver a través del cristal. En estos casos, la colocación de marcas verticales puede ayudar a reducir sustancialmente el número de colisiones, no obstante, se recomienda solicitar la valoración de un experto en fauna silvestre de la región que ayude a discriminar entre los pros y los contras de su colocación.

Por otro lado, las pantallas opacas se construyen de hormigón (ver Figura 3.25), madera, tierra u otro tipo de materiales y, al igual que las pantallas transparentes, son verdaderas barreras para los animales si están situadas en el entorno natural. Su instalación debe combinarse con estructuras que puedan ser utilizadas como pasos de fauna. En este caso, las estructuras sirven también como guía para que los animales localicen el paso, es así que una de las posibles soluciones para reducir este efecto barrera es la construcción de pequeñas aberturas en la base de las pantallas, aunque se desconoce con precisión los efectos de esta medida a nivel de dinámica de las poblaciones afectadas (Luell, 2005).



Figura 3.25
Arriba, barrera acústica, Geelong, Australia;
abajo, barrera acústica, Ramat Hasharón, Israel.

Fuente: Tomado de PALRAM <https://www.palram.com/es/solution/acoustic-barriers-construction-architecture/>

En general, se puede decir que en zonas conservadas o naturales pueden no ser la mejor opción, pero para mitigar el ruido en áreas urbanas, estas pantallas están mejor adaptadas.

Figura 3.26
Barreras protectoras de sonido en autopista de Suiza.
A la izquierda, barrera con montículos de tierra;
a la derecha, con láminas de acero.



Fuente: Imagen a nivel de terreno, tomada de Google Earth para ejemplificar. Consulta 2021.

Ventajas y desventajas de su construcción.

I. VENTAJAS:

- Reducción de ruido hacia la población.
- Mejoran la calidad de vida de la población cercana a la carretera.

II. DESVENTAJAS:

- Su apariencia visual podría no ser atractiva.
- Dependiendo del diseño podrían imposibilitar ver el paisaje desde el coche cuando vamos de viaje.
- No son recomendables en zonas de vegetación natural ya que la fauna podría impactarse en ellas o generar barreras ecológicas.
- Pueden llegar a ser costosas.

3.2.3 Conectividad ecológica

3.2.3.1 Pasos para fauna

Los pasos para fauna son estructuras que permiten el paso a los animales silvestres en la zona donde cruza la infraestructura vial. Estas estructuras pueden ser tan grandes como túneles, viaductos y puentes o bien, de menor tamaño como pueden ser las obras de drenaje.

La planificación de los corredores artificiales forma parte de las medidas aplicadas hoy en día para proteger a los usuarios de la infraestructura lineal, aumentando la seguridad en éstas, además de mantener la conectividad de los ecosistemas y la movilidad de la fauna, y así evitar, por un lado, las colisiones vehículo-animal, así como que los animales sean atropellados y, por otro, que el flujo de interacción continuo entre especies se vea interrumpido.

La seguridad vial y la pérdida de la biodiversidad en relación con los accidentes viales ocasionados por la fauna silvestre es un tema que preocupa a las naciones de todo el mundo. No en vano las discusiones sobre el tema se encuentran en diversos tratados internacionales, donde muchos países suman esfuerzos para contrarrestar la pérdida en biodiversidad a través de acuerdos, como el Convenio de la Diversidad Biológica de 1993.

Uno de los factores que en el mundo atenta contra la biodiversidad es la fragmentación de ecosistemas, ocasionada, por un lado, por acciones enfocadas a satisfacer las necesidades básicas de la población humana y, por otro, por el derroche y mala planificación en el aprovechamiento y uso de los recursos naturales. El fin común y el paradigma planteado hoy en día para combatir a la fragmentación por la infraestructura vial y con ello contribuir con el combate al Cambio Climático, es la conservación y/o recuperación de la conectividad del ecosistema; referida como i) la facilidad con la que los organismos se mueven entre elementos particulares del paisaje, y ii) el número de conexiones entre parches de hábitat con relación al número máximo de posibles conexiones o interrelaciones de procesos clave dentro y entre ecosistemas (DGST, 2020).

En países desarrollados, la construcción de la infraestructura vial contempla la conectividad de los ecosistemas desde la planificación de la red de infraestructura, buscando que ésta sea ecológicamente sostenible considerando un enfoque holístico, que integre factores ambientales, sociales, económicos y políticos. La prevención de los impactos ecológicos es fundamental, y en este sentido, forma parte crucial de las acciones que se deben considerar y tratar de evitar o minimizar, en la medida de lo posible, desde la etapa de planificación.

Los pasos para fauna más conocidos son los denominados “pasos inferiores para fauna” según la denominación del “Manual de diseño de pasos para fauna silvestre en carreteras” (DGST, 2020), utilizados en países como Argentina, Canadá, Australia y Estados Unidos de América, que principalmente están diseñados para animales grandes que forman rebaños. Asimismo, los pasos pueden ser estructuras tan pequeñas como túneles embebidos en la estructura del pavimento para el paso de anfibios y reptiles; escaleras de agua para peces migratorios; túneles y drenajes para mamíferos pequeños, como nutrias, erizos y tejones; corredores de vegetación para mariposas, abejas y aves; pasos aéreos para los mamíferos arbóreos como monos y ardillas, entre otros.

Figura 3.27

Pasos para diversos tipos de fauna en la autopista A50, Holanda.



A)



B)

Fuente: Imagen satelital, tomada de Google Earth para ejemplificar. Consulta 2021.

Los pasos para fauna no solo permiten mantener la conectividad de la biodiversidad, sino que también reduce la severidad de los accidentes en las carreteras, por lo que son excelentes sistemas de seguridad para una Infraestructura Verde Vial. Al implementarlos, se reduce la morbilidad por colisiones vehículo-animal.

Ventajas y desventajas de su construcción.

I. VENTAJAS:

- Favorecen al conectividad entre ecosistemas.
- Contribuyen a disminuir accidentes y colisiones vehículo-animal.
- Contribuyen a reducir la mortandad de la fauna por atropello.

II. DESVENTAJAS:

- Constituyen una medida de mitigación por lo que no evitan la fragmentación total del hábitat.
- Dependiendo de su diseño y función pueden llegar a ser costosos.

3.2.4 Otras alternativas

3.2.4.1 Pavimentos permeables

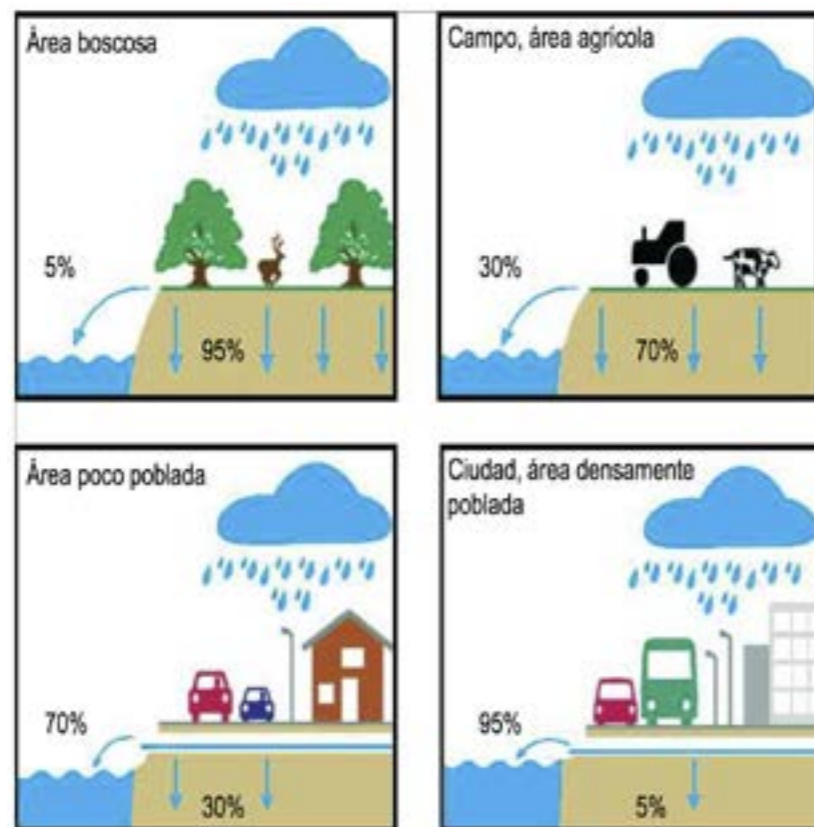
Los pavimentos permeables son superficies de rodamiento y tránsito peatonal o de vehículos fabricados a partir de una mezcla de cemento, agua, agregado grueso y aditivos, resultando en un material con una estructura de vacíos interconectados que permiten al agua y al aire, entre otros, pasar a través de ellos.

Las propiedades del concreto permeable son similares a las del concreto hidráulico convencional fabricado con cemento portland y agregados pétreos, excepto porque presenta una menor resistencia al esfuerzo cortante en virtud de los espacios huecos que permiten la permeabilidad. Esta característica lo convierte en no apto para soportar grandes cargas de rodamiento.

Los pavimentos permeables nacen como una forma alternativa de mitigación del escurrimiento superficial y los caudales pico (generadores de inundaciones) en las zonas urbanizadas, en las cuales la cuenca ha perdido su permeabilidad (Figura 3.28). El objetivo de estos sistemas es generar zonas donde el agua se infiltre o se almacene y se amortigüe la cantidad de agua de lluvia precipitada, aumentando sus tiempos de concentración. Se recomienda su uso en zonas de baja pendiente tales como estacionamientos, vías con tráfico ligero u ocasional y andenes, entre otros, en los que su nivel freático se encuentre muy por debajo del fondo de la zona de almacenamiento para que éste no interfiera ni disminuya el volumen de acopio (Legret *et al.*, 1999; EPA, 1999).

Figura 3.28

Influencia de la urbanización en el % de drenaje natural.



Las ventajas del concreto permeable se extienden a varias ramas de la industria de la construcción, sin embargo, tienen indudablemente su principal aplicación en la construcción de pavimentos y superficies horizontales. De ahí que este material pueda encontrar importantes aplicaciones en la Infraestructura Verde Vial.

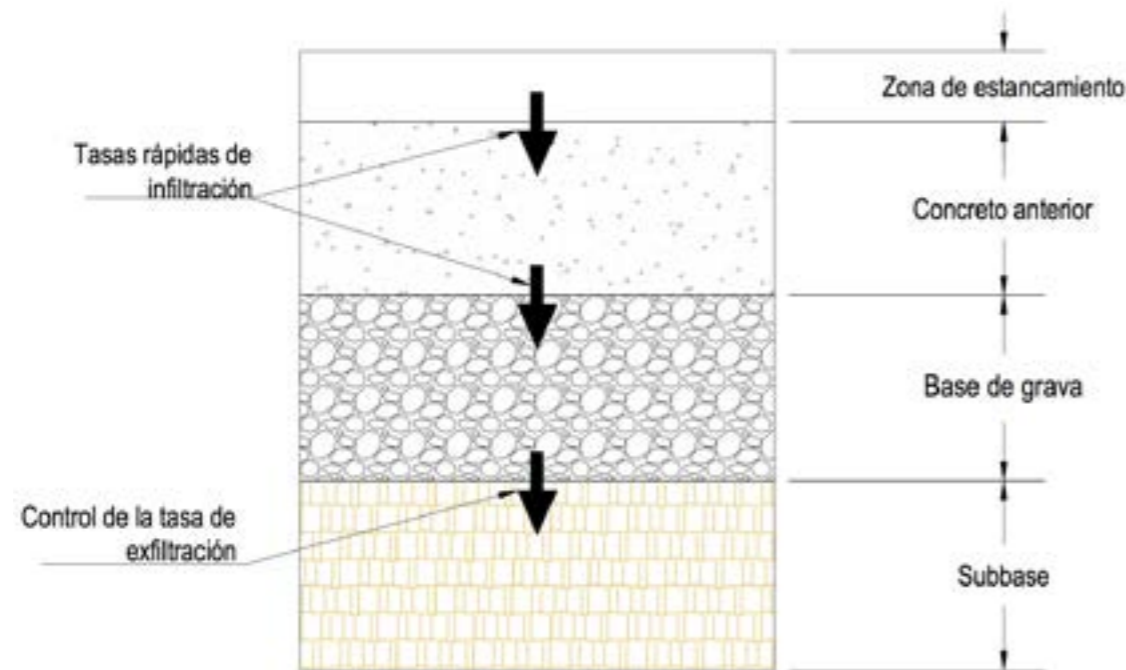
La combinación entre su alta permeabilidad y la rigidez y durabilidad características del concreto hidráulico (con cemento portland como su aglutinante), permite incorporar este material fácilmente en la obra civil que considere importante el manejo del escurrimiento de agua pluvial y la conservación de las fuentes naturales de este líquido. Es muy importante proyectar la obra incluyendo todos los factores que juegan un papel en el diseño hidrológico del pavimento y sus diversos impactos a la ecología para poder lograr un balance económico positivo entre el mayor costo inicial del material y su instalación, y el consecuente ahorro en obras de drenaje y canalización del agua pluvial y su descarga a cuerpos acuíferos.

Una vez que el concreto permeable forma parte de la obra, su mantenimiento se reduce a limpieza esporádica (una vez por año normalmente) y verificación visual de su capacidad de infiltración. Después, las ventajas que provee este tipo de material duran de 20 a 40 años o más, destacando principalmente las siguientes:

- Infiltración del agua de lluvia en el lugar de origen, abatiendo o eliminando el acarreo y escurrimiento a drenaje.
- Infiltración del acarreo de agua de lluvia generado por superficies no permeables (impermeables) adyacentes al concreto permeable, abatiendo o eliminando el acarreo y escurrimiento a drenaje.
- Tratamiento (filtración) de sólidos suspendidos (grasas, aceites, sedimentos, fertilizantes, etc.).
- Retención de metales pesados como plomo, cobre, zinc, cadmio.
- Reducción del ruido generado por tránsito vehicular.
- Reducción de la cantidad de calor absorbida por luz solar en la superficie (alta reflectividad comparada al asfalto), generando menos liberación de calor y contribuyendo al enfriamiento natural del aire.
- Disminución de la superficie destinada a pozos de absorción, contribuyendo de manera natural a la recarga del manto acuífero en el subsuelo por infiltración directa del agua pluvial.

La Figura 3.29 muestra esquemáticamente una sección de pavimento permeable incluyendo el concreto por donde el agua infiltra rápidamente, seguido de una sección de almacenamiento temporal (grava) también de rápida infiltración, y seguida ésta por una sección de suelo natural enrasado y compactado para permitir el exfiltrado al subsuelo, siendo esta última sección el factor que controla el tiempo de vaciado total del pavimento.

Figura 3.29
Pavimento permeable: etapas de filtración.



El diseño de un pavimento de concreto permeable debe considerar varios factores. Las tres consideraciones más importantes son la cantidad de precipitación pluvial esperada, las características del pavimento, y las propiedades del suelo de soporte. Sin embargo, el factor hidrológico de control en el diseño de un sistema de concreto permeable es la intensidad de escorrentía que puede ser tolerada. La cantidad de escorrentía es menor a la precipitación total porque una porción de la lluvia es capturada en las pequeñas depresiones en el suelo (almacenamiento en la depresión), alguna cantidad se infiltra al suelo, y alguna cantidad es interceptada por la superficie. La escorrentía también es una función de las propiedades del suelo, particularmente la tasa de infiltración: suelos secos y arenosos filtran agua rápidamente, mientras que suelos arcillosos densamente compactados casi no absorben nada de agua durante el tiempo crítico de mitigación de la escorrentía. La escorrentía también se ve afectada por la naturaleza de la tormenta de lluvia; diferentes eventos de tormentas resultarán en diferentes cantidades de escorrentía, de tal manera que la selección apropiada de un evento de diseño es importante.

Actualmente, existe una divergencia entre concretos impermeables y la conservación del agua, y hay una imposibilidad para lograr resistencia y permeabilidad en los pavimentos usados en el diseño de carreteras, la cual se puede explicar en términos de los siguientes factores:

- Las vialidades para el tránsito vehicular usualmente se construyen con pavimentos diseñados para cumplir funciones tanto de alta resistencia al esfuerzo cortante como de baja deformabilidad. Sin embargo, la naturaleza de los materiales de construcción asocia una más de manera implícita a estas dos funciones: su baja permeabilidad, causante de reducir la infiltración de las aguas

de lluvia que caen sobre la superficie de rodamiento. Para que estas aguas no dañen la obra deben ser canalizadas a veces a otras cuencas, lo que requiere de costosas obras de drenaje. Por ejemplo, la Ciudad de México invierte enormes sumas de dinero para drenar sus aguas negras y de lluvia que escurren por sus vialidades y después verterlas fuera del Valle de México a través del Emisor Central. En menor medida, esta condición se replica en otras zonas urbanas del país.

- Como esas aguas de lluvia así canalizadas ya no se filtran al subsuelo dejan de contribuir al equilibrio de sus aguas subterráneas disminuyendo el agua disponible para abastecer las poblaciones de la zona, las cuales deben obtenerla de otras regiones mediante costosas obras de captación y conducción. Esto se ilustra otra vez con el caso de la Ciudad de México en donde, al prohibirse que se extrajera agua subterránea, se debió recurrir a la del Valle de Toluca, la cual contribuyó a su agotamiento. Por sobreexplotar sus acuíferos, ahora ambas ciudades deben tomar agua del sistema del río Cutzamala para cubrir parte de sus necesidades.

Los pavimentos permeables forman parte del conjunto de medidas que pueden llevarse a cabo para atender criterios de sustentabilidad ambiental en materia de construcción de infraestructura vial, en particular los relacionados con la conservación, el aprovechamiento y manejo de las aguas de lluvia. Si bien no son muy recomendables para la carpeta asfáltica, sí pueden ser usados en cunetas, caminos de acceso de bajo tránsito o jardineras.

Las aplicaciones en autopistas y carreteras están limitadas por el momento a zonas con baja intensidad de tráfico, como áreas de estacionamiento para vehículos ligeros, no estando recomendados en zonas industriales, gasolineras o lugares en los que se acumulan cantidades de metales pesados importantes. En algunos países se han utilizado para la construcción de acotamientos que permitan capturar el escurrimiento superficial de la carpeta asfáltica y drenarla subterráneamente fuera de la zona de captación.

Ventajas y desventajas de su implementación.

I. VENTAJAS:

- La permeabilidad, la durabilidad y la limpieza de su proceso.
- Se distingue de otros tipos de concretos por su textura y disponibilidad de colores.
- La posibilidad de prescindir de otras estructuras debido a necesidades especiales (p. ej. estructuras de retención, cunetas, sumideros, etcétera).

II. DESVENTAJAS:

- No pueden utilizarse donde haya arrastre superficial de grandes cargas de sedimentos.

- Por ahora no se usan en carreteras con tráfico elevado.
- A largo plazo, si no hay mantenimiento, existe riesgo de crecimiento de malas hierbas y de obstrucciones.

3.2.4.2 Tecnosuelos o suelos artificiales

Los tecnosuelos son suelos creados por el hombre, sustancialmente modificados o fuertemente influenciados por material hecho o expuesto, es decir, es resultado de muchas actividades humanas. Macías (2004; 2007) los define como la mezcla sólida de materiales naturales o sintéticos, minerales u orgánicos que, colocados en superficie, permite la integración rápida de los componentes residuales antropogeomórficos en los ciclos biogeoquímicos, así como el cumplimiento de las funciones ambientales y productivas del suelo, mejorando la situación ambiental precedente.

Son generados predominantemente en zonas urbanas y áreas industriales, carreteras, vertederos y sitios mineros (WRB, 2006). Se caracterizan porque tienen más del 20% de artefactos en los primeros 100 cm desde la superficie del suelo, o hasta roca continua, material duro técnico o una capa cementada endurecida (WRB, 2015), que de otro modo no aparecerían en la superficie de las tierras.

Los suelos artificiales son una oportunidad para mantener los servicios ecológicos y a la vez reciclar los desechos de la ciudad, valorizar los residuos, fomentar su reutilización y reciclaje y así minimizar los efectos que se producen por una inadecuada gestión de éstos.

Macías (2001) traza las primeras directrices en pro de un triple objetivo: la recuperación de suelos degradados, la reutilización con valorización de residuos y el secuestro de carbono. Todo esto planteado como una alternativa completa para mejorar la calidad ambiental de diferentes entornos. La primera normativa a nivel mundial sobre la producción de tecnosuelos como un proceso de valorización de residuos se dictó en la junta de Galicia (2005, modificada en 2008), con las siguientes metas:

- Contribuir a la solución de forma simultánea de los problemas de la gestión de residuos por medio de su valorización y de la recuperación de suelos degradados o contaminados a costos asumibles y ambientalmente correctos.
- Eliminar o reducir fuertemente los impactos de los residuos sobre los sistemas más sensibles tales como: agua, aire y biota.
- Estabilizar el carbono en suelos y biomasa.
- Reciclar nitrógeno, fósforo, potasio y otros macro y micronutrientes, así como materiales que tengan componentes y propiedades útiles.
- Cumplir las funciones productivas y ambientales.

Ventajas y desventajas de su construcción.

I. VENTAJAS:

- Son sostenibles, ya que se pueden utilizar residuos que procedan de su entorno inmediato, tales como residuos de excavación, residuos de construcción, jales mineros, escorias y cenizas, lodos residuales, y residuos vegetales principalmente.

- Económicos, ya que utilizan material que se considera residuo.
- Ecológicos, ya que pueden proveer funciones como evitar el calentamiento global ya que se ha probado que son un sumidero de CO₂.

II. DESVENTAJAS:

- No recupera la funcionalidad natural del suelo.
- Pueden generar altos costos de construcción.
- Requiere mantenimiento.

3.2.4.3 Sistemas inteligentes de transporte (ecodriving)

El incremento en el número de vehículos en circulación ha provocado una destrucción de los espacios verdes y otros efectos negativos al ambiente. Uno de los fenómenos más presente es el efecto invernadero, donde los gases de efecto invernadero causan que la energía solar quede atrapada en la atmósfera, generando que los diferentes componentes y procesos ambientales se calienten. De los principales gases que se identifican se encuentra el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y los hidrofluorocarbonos, donde el sector de transporte es reconocido como un alto generador y contribuyente al Cambio Climático debido a procesos de infraestructura y tráfico (Barbero y Rodríguez-Tornquist, 2012).

El *ecodriving* o sistema de conducción eficiente es una técnica de conducción que permite ahorrar combustible con independencia o no de la tecnología del vehículo, y que se basa en el control de las variables sobre las que puede actuar el conductor como: la velocidad, el freno, el sistema de aire acondicionado, la marcha y la desaceleración. Aplicando esta técnica de conducción se puede ahorrar hasta un 25% de combustible, aunque este porcentaje depende de la habilidad del conductor, el tipo de vehículo y el estado del entorno. Este último es de suma importancia, ya que las emisiones vehiculares y su cantidad se ven afectadas también por diferentes parámetros, entre ellos la geometría de la carretera y la operación de la carretera, los cuales influyen directa e indirectamente en el aumento del consumo de combustible y así en las emisiones contaminantes (Díaz-Jaimes, 2020). En España se ha demostrado que simplemente con mejorar el pavimentado de la infraestructura vial se puede ahorrar 1,6 millones de toneladas de CO₂ al año en carreteras de España.

Esta técnica de conducción tiene además efectos positivos en la seguridad. Los programas de aprendizaje sobre conducción eficiente pueden reducir los accidentes de tráfico alrededor de un 35%, el consumo de combustible al menos en un 11% y la emisión de gases contaminantes entre un 25% y un 50% (Magaña, 2014).

Algunas de las propuestas para ahorrar combustible se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 3.2
Comparación de las propuestas para ahorrar combustible.

Solución	Ahorro máximo de combustible
Reducir la velocidad.	6.40%
Minimizar las detenciones (en el caso de México, la existencia de topes es un factor que afecta al <i>ecodriving</i>).	13.90%
Algoritmo para la obtención de la velocidad óptima basado en la información del estado de los semáforos.	12%
Modelo de control basado en la ecuación de la fuerza de tracción y en los algoritmos de colonias de hormigas.	10.80%
Modelo de control basado en la velocidad media del tramo de carretera y el nivel de congestión.	20%
Modelo para la obtención de la marcha óptima basado en algoritmos genéticos y lógica difusa.	10.97%
Patrón de velocidad óptimo obtenido aplicando programación dinámica.	20%
Sistema <i>start-stop</i> .	10%
Eco-pedal.	10%
Mostrar consumo de combustible instantáneo.	6%
Recibir clases sobre <i>ecodriving</i> .	4.80%
Compartir del consumo de combustible entre un grupo específico de usuarios.	4.60%
Notificación de las emisiones de gases contaminantes mediante una interfaz vibro-táctil.	8%

Por otro lado, el *eco-routing* es un concepto que consiste en encontrar la ruta óptima desde el punto de vista de la eficiencia energética. Numerosos estudios muestran que la selección de diferentes rutas para un mismo recorrido produce diferentes cantidades de consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes. La importancia de la elección de ruta en el consumo de combustible se observa en los viajes, por ejemplo, en un experimento en Europa se observó que en el 46% de los viajes que se realizaron por rutas no óptimas, se pudo haber ahorrado un 8% del combustible, si se hubiese seguido una ruta óptima.

Recientemente se han estado desarrollando sistemas de navegación *eco-routing* para encontrar la ruta que consuma menor cantidad de combustible. Los resultados indican que la ruta más corta no siempre es la de menor consumo. Otros factores como las características de la carretera, del vehículo y el tráfico también influyen de forma significativa en el consumo y la emisión de gases contaminantes.

Ventajas y desventajas de su implementación.

I. VENTAJAS:

- Ahorro económico para las empresas de transporte.
- Aumento del tiempo de vida de los componentes del vehículo.
- La conducción eficiente basada en la antelación, el conductor tiene más tiempo para la toma de decisiones, permitiéndole minimizar el uso e intensidad de los distintos componentes del vehículo.
- Reducción de emisiones: las emisiones de CO₂ del vehículo y otros gases contaminantes están relacionados de forma directa con la combustión de los motores tradicionales.
- Disminución del riesgo, mitigación de los accidentes de tráfico e incremento de seguridad.
- Mejora del flujo de tráfico: utilizando esta técnica de conducción se realizan las aceleraciones de forma más efectiva y se ajusta la velocidad evitando las detenciones y maximizando la inercia.

II. DESVENTAJAS:

- No existe un consenso relativo a las reglas de conducción eficiente. Éstas varían entre los diferentes países y fabricantes.
- Requiere conocimiento técnico especializado sobre conducción eficiente.
- La malinterpretación de los consejos de conducción eficiente puede provocar además situaciones de peligro.
- Algunas técnicas de *ecodriving* pueden atentar contra la seguridad. Recomendaciones como reducir el uso del freno o circular con marchas elevadas puede tener un efecto adverso sobre el control del vehículo.

3.2.4.4 Bajo puentes

Los bajo puentes por lo general son construidos para permitir el paso del agua, vehicular o de peatones, entre otras cosas, pero ante el abandono o la falta de planificación, se genera una condición de subutilización que fortalece el desamparo, promoviendo así la constitución de lugares inseguros, bodegas, focos de contaminación, basureros, centros de comercio informal, lugares de resguardo para población en situación de calle o sitios de actividades ilícitas (González *et al.*, 2014). Los espacios públicos subutilizados pueden ser entendidos como aquellos lugares cuyo uso actual colectivo es evidentemente inferior a su potencial de aprovechamiento y cuya recuperación puede ser con fines culturales, recreacionales, comerciales o de servicios. Estos espacios públicos subutilizados (EPS) deben poseer características físicas, geográficas y administrativas idóneas para su recuperación y transformación en la búsqueda de generar espacios funcionales y adecuados en beneficio de los usuarios.

El entorno urbano ha puesto énfasis en su reciente etapa a la construcción de infraestructura urbana vehicular, construcción para uso de vivienda e incluso industrial, dejando de lado la recuperación de espacios públicos subutilizados, los cuales pueden ser mejorados y aprovechados.

Particularmente, con la construcción de infraestructura vial, la atracción de asentamientos irregulares puede llegar a ser un tema común si no se ejerce una adecuada planificación, esto se debe a que al abrirse nuevos espacios (en ocasiones antes inalcanzables o impenetrables por el ser humano), es común que ahora pueda llegar población humana a querer hacer uso del espacio, pero sin un orden que permita asegurar su bienestar. Es así que después de la construcción de una infraestructura vial, se puede observar con el paso del tiempo que se comienza a habitar el espacio alrededor de ella.

Ante el panorama expuesto, es necesario que los espacios públicos subutilizados reciban una atención especial considerando los impactos que negativa y positivamente pueden generar en las regiones, así como en la población usuaria de estos espacios. La intervención por parte de instituciones públicas es un elemento indispensable para la reconversión de estos sitios, para permitir que los habitantes de la ciudad cuenten con espacios que les permitan desarrollar actividades de recreación, descanso y convivencia, en donde se perciba un ambiente de seguridad y protección, mejorando el valor social y económico de los espacios intervenidos y la calidad de vida de los habitantes. En este sentido, se ha visto que con una adecuada planificación los bajo puentes pueden ser transformados en sitios seguros y dignos para los vecinos al convertirse en parques, espacios públicos para la recreación, ejercicio físico, e incluso podrían convertirse en foros culturales y de opinión que brinden servicios culturales a la comunidad.

Bajo el esquema de recuperación de espacios, en la Ciudad de México se han generado estrategias de recuperación de espacios públicos subutilizados a través de acciones como el Proyecto de Recuperación de Bajo Puentes diseñado por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda de la Ciudad de México (SEDUVI) en coordinación con el Gobierno de la Ciudad de México, la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT), y la Agencia del Espacio Público (AEP).

El Proyecto de Recuperación de Bajo Puentes posee en su naturaleza misma lineamientos institucionales para la búsqueda de la mejora de las condiciones de vida de los usuarios. Sin embargo, la ausencia de vinculación entre instituciones participantes, así como la falta de reglas de operación y términos de referencia oficiales en torno a los proyectos de recuperación de espacios públicos subutilizados, han dificultado la implementación y mantenimiento de los espacios, dando como resultado espacios recuperados deficientes con efectos positivos limitados. Por lo tanto, el cumplimiento de los objetivos de estos proyectos de recuperación de espacios públicos en materia de ubicación, seguridad, infraestructura y movilidad es insuficiente. No obstante, estos lugares colectivos tienen el potencial de ser favorables para la convivencia social a partir de mejorar el entorno y el paisaje y promover el ingreso de un ambiente social saludable. No obstante, el potencial de los espacios para promover el bienestar de la población depende de que éstos sean objeto de acciones de recuperación, las cuales pueden darse de distintas formas dependiendo del territorio en cuestión.

Figura 3.30

Condición de espacios subutilizados en los bajo puentes de las ciudades.



Fuente: Tomado de <https://www.chilango.com/cultura/5-microhistorias-de-bajo-puentes-en-el-df/> y <https://www.epicentrochile.com/2017/08/06/municipio-realizo-operativo-limpieza-despeje-puente-mercado/>

Figura 3.31
Skatepark en bajo puente, Celaya, México.



Fuente: Tomado de <https://www.am.com.mx/guanajuato/noticias/Avanza-skate-park-bajo-puente-en-Celaya-20200604-0045.html>

Para las zonas alejadas de la población, los bajo puentes deben presentar como objetivo principal la conectividad ecosistémica y por lo tanto, la permeabilidad ecológica. En este esquema, la construcción de los pasos para fauna son una alternativa para promover la conservación y el uso eficiente del espacio; pero en zonas de mayor urbanización o incluso en ambientes rurales, los bajo puentes pueden constituir un importante centro de desarrollo social.

Ventajas y desventajas de su construcción (Magaña, 2014).

I. VENTAJAS:

- Favorecen la convivencia social a partir de mejoras en el paisaje, promoviendo así el ingreso de un ambiente social saludable.
- Permiten desarrollar espacios que fomentan las actividades de recreación, descanso y convivencia en donde se percibe un ambiente de seguridad y protección que mejora la calidad de vida de los habitantes.
- Pueden generar ingresos al convertirse en centros de comercio.

- Se evita la contaminación de los cuerpos de agua.
- Evitan la formación de espacios delictivos e inseguros.
- Evitan los espacios insalubres donde proliferen plagas o agentes infecciosos para la población y los ecosistemas.

II. DESVENTAJAS:

- De no realizar los estudios adecuados que permitan identificar las necesidades de la población, pueden convertirse de poco interés para la población y, por lo tanto, no ser utilizados.
- Implican un gasto de mantenimiento, aunque éste se puede justificar o recuperar con una adecuada planeación del espacio.

3.2.5 Síntesis de las alternativas de componentes de la Infraestructura Verde Vial y sus beneficios

A continuación, se presenta un resumen de los tipos de componentes o estructuras de la Infraestructura Verde Vial antes expuestos y los servicios ecosistémicos y/o servicios ambientales que éstos pueden ofrecer.

Tabla 3.3
Síntesis de tipos de componentes de la Infraestructura Verde Vial
y los servicios que proveen.

Tipo	Ubicación		Servicios ecosistémicos					
	Dentro del derecho de vía	Fuera del derecho de vía	Retención de agua	Infiltración	Recarga del acuífero	Control de erosión	Soporte a plantas	Filtración de contaminantes (amortiguamiento)
Vegetación en el derecho de vía	X	X	X	X	X	X		X
Terrazas	X	X	X	X	X	X	X	
Cunetas secas	X		X	X	X		X	X
Cunetas húmedas	X		X	X	X		X	X
Franjas filtrantes	X	X	X	X	X		X	X
Drenes filtrantes	X		X	X	X			X
Estanques y humedales	X	X	X	X	X		X	
Cuencas de retención		X	X	X	X	X	X	X
Pozos de infiltración	X	X	X	X	X			X
Tipo	Ubicación		Servicios ambientales					
Sistemas de energía solar	X	X						
Sistemas de energía eólica	X							
Pantallas acústicas	X							
Pasos para fauna	X						X	
Pavimentos permeables	X	X	X	X	X			
Tecnosuelos o suelos artificiales	X	X	X	X	X	X	X	X
Sistemas inteligentes de transporte <i>ecodriving</i>	X							
Bajo puentes	X							

brindados								
Ornamental	Mitigación de GEI	Ruido	Polinización	Biodiversidad	Conectividad ecológica	Cultural y social	Seguridad	Servicios ecosistémicos de provisión
X	X	X	X	X	X	X		
X			X					
X								
X			X	X	X	X		
X	X		X	X	X	X		
						X		
brindados								
	X					X		X
	X					X		X
		X				X		
X	X	X	X	X	X			
	X							
	X					X		
X				X		X	X	



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA
DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

CAPÍTULO 4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE VIAL

Generalidades

Una vez identificado el potencial para ofertar servicios ecosistémicos y ambientales; identificados los sitios donde es necesario implementar acciones para fortalecer la conectividad ecológica y potencializar los servicios referidos; seleccionado, discutido y visualizado los tipos de componentes de infraestructura verde que pueden ser implementados para conformar la Infraestructura Verde Vial y, finalmente, con la organización y coordinación de los diferentes actores y los equipos de trabajo, se puede proceder entonces a diseñar y construir la Infraestructura Verde Vial.

Es importante recordar que los proyectos con potencial para el desarrollo de la Infraestructura Verde Vial son muy diversos, pero en general deben establecer redes de conectividad ecológica, restablecer el valor productivo del área y atender problemáticas de pérdida de la biodiversidad, regulación climática y servicios ecosistémicos en contexto con la Agenda 2030 que rige a nivel nacional. Para avanzar con esta etapa, se recomienda haber leído antes los antecedentes, el marco teórico y el capítulo de Planeación de este Manual.

En este capítulo se presentan algunas consideraciones para el diseño y construcción de Infraestructura Verde Vial.

4.1 Especificaciones técnicas para el diseño y construcción de la Infraestructura Verde Vial en materia de servicios ecosistémicos

Una vez que se haya realizado el reconocimiento de los servicios ecosistémicos presentes en el área del proyecto y que se hayan identificado aquellos componentes que conformarán la Infraestructura Verde Vial de acuerdo con las características y necesidades del sitio, se deberá realizar un diseño integral para conformar la Infraestructura Verde Vial. Este diseño acorde a las características del espacio deberá ser planteado por un equipo multidisciplinario para garantizar el éxito y el correcto funcionamiento del proyecto. Algunas especificaciones técnicas para su diseño y construcción se mencionan a continuación.

4.1.1 Especificaciones técnicas de la vegetación en el derecho de vía

En primera instancia, el acomodo de la vegetación se llevará a cabo considerando las características de la cubierta vegetal presente en el área de influencia de la vía para

poder fomentar las interrelaciones con el ecosistema adyacente y en vínculo con los corredores ecológicos. Existen algunas consideraciones genéricas para el diseño de la vegetación, que son aplicables a todos los tipos de obras de Infraestructura Verde Vial (Watershed Management Group, 2012). A continuación se enlistan algunas de ellas:

I. SELECCIÓN DE LA PALETA VEGETAL.

La selección de la paleta vegetal es una etapa decisiva en el desarrollo de la Infraestructura Verde Vial, ya que ésta debe ser adecuada considerando su funcionalidad en términos de lo requerido para el proyecto y se deben tomar en cuenta los requerimientos ecológicos de las plantas seleccionadas en consideración a la ubicación donde se instalarán.

La vegetación podrá ser obtenida de dos principales proveedores, a través de una red de viveros o mediante propagación vegetativa y/o germoplasma colectado. Del vivero se pueden obtener las especies que debido a su popularidad dentro de la producción de ornato, se encuentran con relativa facilidad, mientras que del segundo se pueden producir aquellas especies que no fueron encontradas en viveros.

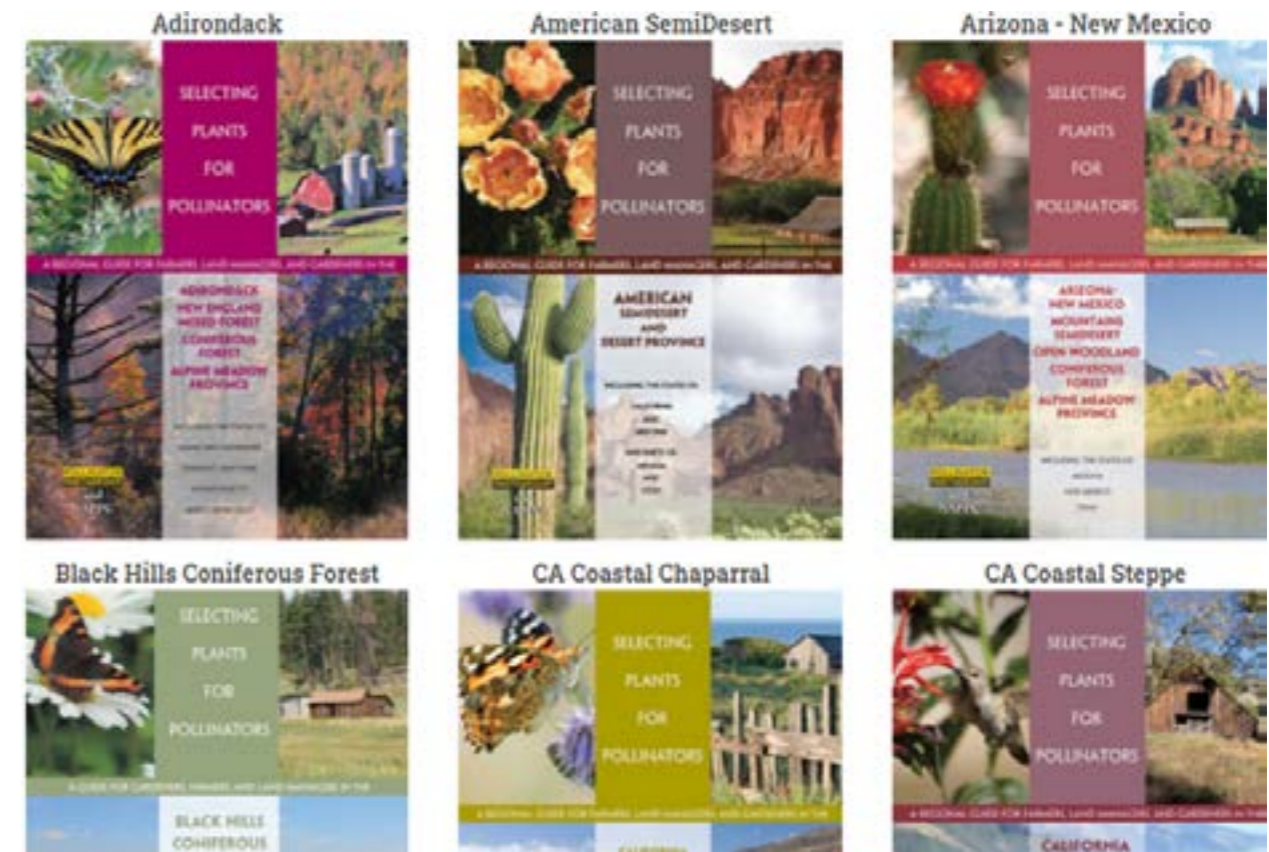
Para la selección de la paleta vegetal se considerará el espacio disponible para implantar vegetación en la Infraestructura Verde Vial y en vista de la superficie será la distribución de las especies y de cada individuo, generando así una paleta vegetal fundamentada en criterios hidrológicos. El agua, como recurso básico para las áreas donde se coloque la vegetación, será proporcionada durante la temporada de lluvias, por lo que todas las plantas deberían de sobrevivir con la reserva de agua acumulada en su estructura durante los meses de mínima precipitación pluvial. No obstante, deberán considerarse sistemas de riego u otros mecanismos de auxilio en caso de seleccionar especies vegetales que no puedan subsistir con el régimen de lluvias local.

En términos generales, no hay una selección definitiva en cuanto a las especies a utilizar, ya que el país cuenta con un vasto listado de flora nativa. No obstante hay herramientas que pueden ayudar en la selección, tal como el portal "ENCICLOVIDA" (CONABIO, 2021) donde se puede hacer uso de los filtros para la búsqueda de especies locales y de interés para su conservación.

Otros listados de especies se pueden consultar en la publicación "Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación" elaborado por el Instituto de Ecología y la CONABIO (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999), donde se pueden consultar propuestas para implementar dentro de la selección de la paleta vegetal (http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/J084_Fichas%20de%20Especies.pdf).

También existen para diferentes regiones del país algunas publicaciones locales sobre el tipo de vegetación presente, las cuales pueden servir de ayuda para la elección e implementación de las paletas vegetales dentro de la Infraestructura Verde Vial. Asimismo, hay fuentes de información internacional que pueden ser de ayuda en regiones donde es relevante la continuidad ecológica a nivel regional, por ejemplo, en el caso de la frontera entre México y EUA, las guías de Pollinator Partnership (2021) presentan paletas vegetales favorables para mantener la continuidad en ambas regiones y favorecer a los polinizadores de la región (Figura 4.1).

Figura 4.1
Ejemplos de paleta vegetal a utilizar en zonas donde se busca una continuidad ecológica regional.



Fuente: Tomado de Pollinator Partnership, 2021. <https://www.pollinator.org/guides>

Como se ha señalado, la distribución de plantas en el espacio se realizará de acuerdo con los objetivos funcionales y estéticos que se quieren conseguir y/o a las necesidades y normatividad de la infraestructura vial; algunos factores a considerar son los siguientes:

Las necesidades del tráfico, tales como:

- a) La seguridad vial.
 - Las distancias de visibilidad en curvas, cambios de rasante y cruces.
 - La visibilidad de los tableros de señalización.
 - La lucha contra el estrechamiento óptico de la calzada.
 - El deslumbramiento.
- b) La conservación, como puede ser:
 - La lucha contra los incendios.
- c) Las influencias del tiempo, como pueden ser:
 - La insolación suficiente para impedir al máximo la formación de encharcamientos.
 - El goteo de las plantaciones y la caída de hojas sobre la calzada.

- d) La propiedad privada:
- Las limitaciones debidas a predios de propiedad privada.

Finalmente, en favor de la seguridad vial, el diseño de las plantaciones deberá cumplir con los siguientes criterios:

- La plantación nunca debe ocultar las señales de tráfico, en toda distribución se tendrá en cuenta que la visibilidad de las señales no sea interceptada por las plantaciones.
- Se evitará que el sistema radical de las plantas pueda dañar los sistemas de drenaje, el afirmado, las conducciones de todo tipo (agua, electricidad, etc.), los cerramientos, las vallas de seguridad, etcétera.
- Se evitará el que las plantaciones impidan o dificulten el acceso a otras vías, zonas agrícolas o forestales, núcleos o viviendas aisladas, cañadas, etcétera.
- Durante los cambios en la rasante lo aconsejable es comenzar la plantación antes de llegar al punto más alto, para que no se produzcan contrastes de modo brusco, y así señalar por dónde irá la calzada detrás del cambio de rasante, si en línea recta, o en curva. La altura de las plantas irá disminuyendo a medida que nos aproximemos al punto más alto. Puede plantarse en ambos lados de la infraestructura vial.
- Para que no se produzca una reducción de la visibilidad en los cruces, las plantaciones deberán limitarse en su tamaño para dejar despejadas las intersecciones.
- En los cruces, las plantaciones no deberán obstruir las visuales del conductor, no sobrepasando los 0.5 m de altura. La distribución de las plantas se hará en función del tráfico, teniendo muy en cuenta las velocidades base que rijan en cada caso.
- En las bifurcaciones, las dos direcciones propuestas se apreciarán mejor si son separadas mediante vegetación convenientemente distribuida, de forma que ésta no suponga un peligro para la circulación.
- En las entradas a una población, el diseño de la vegetación puede producir un efecto que haga que el conductor visualice el final de la carretera interurbana y tienda a reducir su velocidad. Esto se puede conseguir, por ejemplo, mediante el efecto puerta, por el cual el arbolado produce un efecto de estrechamiento en la calzada que tiende a bajar la velocidad del tráfico.
- En las zonas donde se dispongan pistas ciclistas y peatonales adosadas a la calzada, es conveniente realizar la separación entre el tráfico y éstas mediante la plantación de árboles y/o arbustos que delimiten las zonas.

II. CONSIDERACIONES DE DISEÑO POR ESTRATO VEGETAL.

a) Árboles.

El hábito de crecimiento de los árboles puede variar considerablemente, incluso en una misma especie puede crecer en diferentes ambientes. Muchos árboles crecen a partir de un tronco principal, que se ramifica en la parte superior para formar una copa, el tamaño de la copa determina el espacio total del tallo. Las plantaciones con

densidades altas tienden a crecer como una masa de tallos altos y delgados, con pequeñas copas. Algunas especies pueden dispersarse por las raíces y formar matorrales densos.

Estética: son fundamentales para crear paisajes atractivos.

Colocación: deben plantarse en superficies elevadas adyacentes a áreas de biorretención o en explanadas elevadas dentro de ellas. Los sistemas de raíces extensas de los árboles les permiten alcanzar el agua mucho más allá del alcance de sus hojas.

Requieren más agua que otras plantas y pueden requerir riego en zonas sin escorrentía significativa, proveniente de las superficies duras o pavimentadas.

Otras consideraciones: algunas regiones desérticas tienen pocas especies de árboles nativos, en estas zonas pueden usarse árboles de otro tipo de ecosistemas similares a las condiciones del sitio, o con requerimientos del mismo ecosistema, considerando aspectos como es, por ejemplo, la necesidad de agua. En estas áreas se recomienda utilizar especies de plantas como *Yucca sp.*, *Beaucarnea sp.*, *Brahea sp.*, *Quercus sp.*, *Juniperus sp.*, y *Bursera sp.*

b) Arbustos.

Típicamente, los arbustos tienen una distribución densa, son leñosos y tienen un crecimiento perenne, con muchos tallos bien ramificados.

Estética: crean un “nivel intermedio”, un importante elemento estético que normalmente hace falta entre árboles altos y plantas más pequeñas.

Colocación: es mejor que se siembren en la inclinación de la zanja/depresión o en una plataforma elevada justo arriba del nivel de inundación, donde estén dispuestos de forma que las raíces alcancen la humedad del suelo, pero no en una posición tan baja que puedan permanecer inundadas por largos periodos de tiempo.

c) Suculentas (cactus, agaves, yucas, etcétera).

Estética: proporcionan elementos de un paisaje único y escultural que ayudan a definir un sentido de lugar.

Suculentas como los ocotillos y algunas yucas pueden proporcionar elementos verticales a los paisajes, usando mucha menos agua que los árboles.

Colocación: deben plantarse por arriba del nivel de inundación en los depósitos de biorretención. Utilizan muy poca agua y pueden usarse en zonas que no reciben escorrentía extra proveniente de las superficies duras.

Otras consideraciones: las flores y frutos de los cactus y las suculentas son importantes fuentes de alimento para una variedad de aves, murciélagos y otros mamíferos.

No ayudan mucho a filtrar el agua de lluvia o construir suelo, aunque no deben ser el único tipo de plantas que se usen en Infraestructura Verde Vial.

d) Pastos.

Los pastos son una familia ampliamente dispersada y versátil, son empleados por el hombre para una variedad de propósitos. El pasto es comúnmente empleado en el contexto ingenieril, así como las herbáceas. Los pastos se establecen rápidamente y proporcionan una cobertura del suelo densa, responden bien a muchas diferentes técnicas de manejo y en diversos usos de suelo. Los pastos se dispersan vegetativa-

mente por medio de hijuelos, produciendo nuevos rizomas a partir de la base de los tallos existentes. Los rizomas y estolones son tallos modificados que crecen por debajo del suelo y posteriormente se diseminan a través de la superficie. Los rizomas son particularmente útiles en la bioingeniería porque pueden formar una masa de tallos resistentes debajo del suelo con considerable fijación estructural, aunque las raíces de los pastos raramente crecen profundamente. El factor más importante en el hábito de crecimiento de los pastos es que los principales puntos de crecimiento están a nivel del suelo.

Estética: pueden proporcionar increíbles elementos al paisaje.

Colocación: por lo general sobreviven tanto a inundaciones como a largas sequías en buenas condiciones y dan los mejores beneficios al limpiar agua de lluvia en el fondo de las zonas de biorretención.

Otras consideraciones: es importante considerar especies que sean nativas, ya que son altamente funcionales para la retención de suelo y la captación hídrica, requieren un bajo mantenimiento una vez instalados, especies como *Aristida sp.*, *Bothriochloa barbinodis*, *Bouteloua sp.*, *Chloris submutica*, *Digitaria californica*, *Muhlenbergia arenicola*, *Pleuraphis mutica*, entre otras, son recomendables siempre que sean utilizadas correspondiendo al tipo de vegetación y los tipos de suelo preponderantes en la región.

e) Flores nativas.

Estética: por lo general son las primeras plantas en alcanzar la madurez dentro de la obra de Infraestructura Verde Vial y pueden aportar color y estética en los sitios mientras se genera el periodo de establecimiento inicial de los árboles y arbustos.

Sembrar plantas anuales puede crear una ola de color estacional en la primera temporada de lluvias posterior a la plantación, pero rápidamente se secan cuando regresan las condiciones de calor/frío. Se deberá planear el mantenimiento de acuerdo con estas consideraciones.

Colocación: tienen una tolerancia variable a las inundaciones, por lo que se recomienda sean especies de tipo local, se pueden utilizar especies de *Ipomoea sp.*, *Salvia sp.*, *Dalia sp.*, *Euphorbia sp.*, *Anthurium sp.*, *Cuphea sp.*, etc. La selección debe realizarse pensando en la conservación de la vegetación como una masa continua, la cual no se debe de remover por temporadas, como se realiza en camellones y/o glorietas, ya que los elementos de ornato también cumplen una función ecológica con cada ciclo fenológico.

f) Herbáceas.

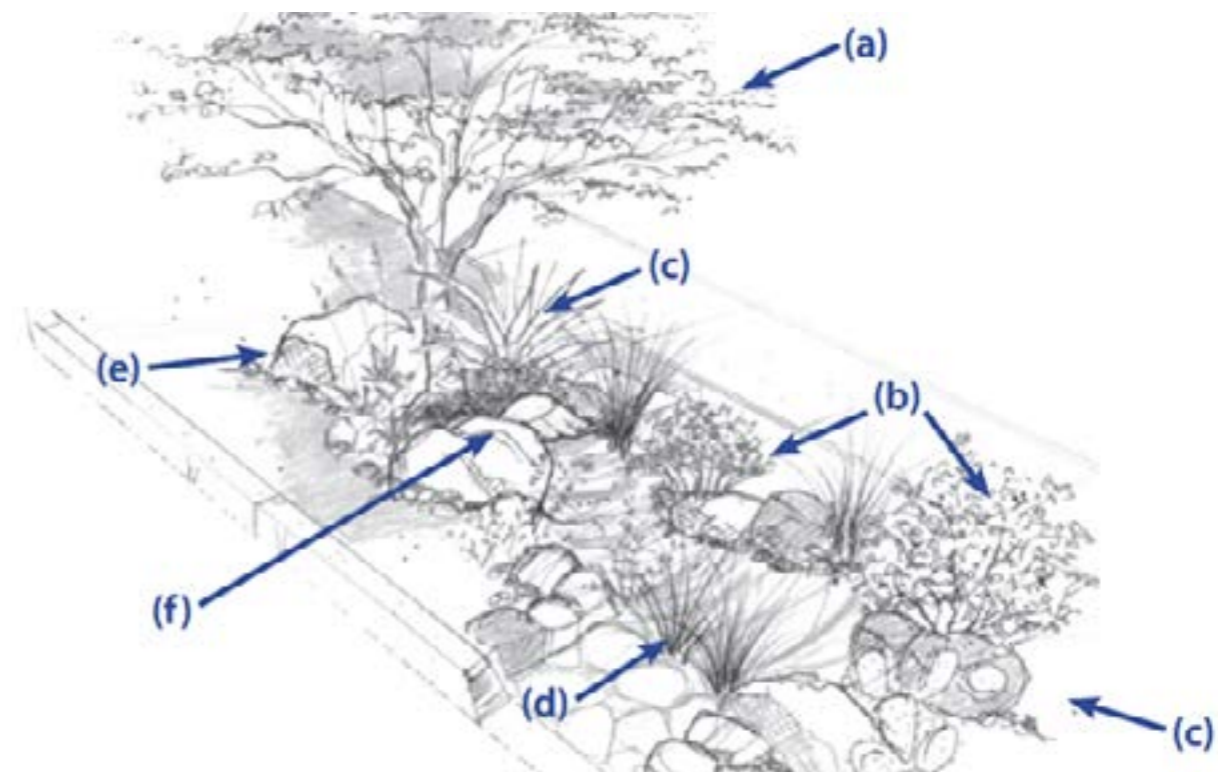
Son plantas con hojas amplias cuyas estructuras aéreas no son leñosas. Incluyen plantas silvestres y plantas cultivadas y forrajeras como leguminosas (frijol, lupino). Pueden tener un solo tallo o multitallos que pueden expandirse y arrastrarse para formar nuevos individuos.

Estética: ayudan a crear una sensación de exuberancia incluso en zonas áridas.

Colocación: tienen una tolerancia variable a las inundaciones, por lo que se recomienda que sean especies de tipo local. La selección debe realizarse pensando en la conservación de la vegetación como una masa continua a la cual no se debe de

remover por temporadas como se realiza en camellones y/o glorietas, ya que los elementos de ornato también cumplen una función ecológica con cada ciclo fenológico.

Figura 4.2
Ejemplo de diseño de la cubierta vegetal en la Infraestructura Verde Vial considerando distintos estratos.



a) Árboles c) Suculentas e) Flores nativas
b) Arbustos d) Pastos f) Herbáceas

Fuente: Tomado de Watershed Management Group, 2012.

g) Sistema de raíces.

Los sistemas de raíces son particularmente interesantes para los ingenieros por su importancia fundamental para muchas de las funciones que la vegetación puede desempeñar. Éstos varían desde sistemas fibrosos muy finos, a través de sistemas ramificados a una raíz pivotante. Todas las plantas tienen una capa de raíces finas superficiales, cuya función principal es absorber nutrientes.

Las raíces crecen en los horizontes superficiales porque en éstos se localizan los nutrientes. Las raíces gruesas y que penetran a profundidad (pivotantes) se usan para el anclaje y la absorción de agua. Frecuentemente se asocian con el almacenamiento de alimento para que las plantas puedan alimentarse durante el invierno, especialmente cuando las partes aéreas mueren sustancialmente. Las raíces pivotantes son estructuras perennes, mientras que las raíces fibrosas finas están sujetas a ciclos anuales de decaimiento y renovación.

La mayor parte del sistema radical tiene el propósito de extraer agua. Cada especie tiene su propia conducta de enraizamiento, pero el tipo de suelo es uno de los factores que puede influenciar fuertemente el desarrollo de las raíces. Por ejemplo, en suelos bien drenados, las raíces tienden a ser más profundas y exploran un volumen de suelo mucho más grande que aquéllos en suelos húmedos. Cuando el nivel freático está cercano a la superficie o cuando existe una capa densamente compactada de suelo, se fuerza a que las raíces se expandan lateralmente. La mayoría de las raíces usualmente se localizan a 30-40 cm de profundidad en las especies herbáceas, y alcanzan más de tres metros de profundidad en la vegetación dominada por árboles y arbustos. Aunque muchas raíces que penetran a profundidad son deseadas en la ingeniería, la proporción de raíces que llegan a profundidad es usualmente muy pequeña.

La extensión de los sistemas de raíces, especialmente los árboles, puede ser considerable. La "zona de influencia" de los árboles sobre suelos arcillosos se considera aproximadamente de 1.5 veces su altura para especies con una demanda alta de agua, 0.75 veces para especies con una demanda media de agua y 0.5 veces para demandantes bajos de agua (NHBC, 1985). Estas estimaciones dan una idea del potencial de extensión del sistema de raíces de los árboles, aunque necesitan ser modificados tomando en cuenta los diferentes tipos de suelo y las condiciones del nivel freático.

La aplicación de fuerzas de tensión y compresión a las raíces las estimula para engrosarse. Por ejemplo, se ha observado que en las laderas las raíces más robustas crecen de manera oblicua a la colina, funcionando como anclaje. La fuerza de tensión varía con respecto al tamaño y edad, especie y condiciones del sitio.

El diseño de los proyectos de vegetación en la Infraestructura Verde Vial puede variar dependiendo de la zona donde se implementarán y de las especificaciones propias de cada tramo de carretera.

III. CONSIDERACIONES DE DISEÑO POR CALIDAD PAISAJÍSTICA.

a) La valoración del potencial ornamental.

Para planificar el diseño y mejorar o mantener la calidad paisajística de la Infraestructura Verde Vial, se debe considerar la valoración del potencial ornamental de las especies vegetales (el aroma, el tamaño del tallo, el color, el número de hojas y de flores, la forma, la textura y la fenología) (Farina *et al.*, 2007; Hitchmough *et al.*, 2004; Hitchmough y Woudstra 1999; Morrison, 2004), pero también su capacidad de adaptación y resistencia a las condiciones ambientales presentes en la Infraestructura Verde Vial (Sánchez, 2005). Algunas consideraciones para tomar en cuenta en la selección de especies ornamentales en la Infraestructura Verde Vial se muestran en la Tabla 4.1. Cabe resaltar que esta Tabla sólo pretende brindar una sugerencia, por lo que el diseño de la Infraestructura Verde Vial puede variar dependiendo de la zona donde se implemente y de las especificaciones propias de cada tramo de infraestructura vial según el especialista a cargo (ecólogo o biólogo especialista en vegetación).

Tabla 4.1
Matriz de valoración de criterios para la selección de plantas con potencial ornamental para uso en paisajismo.

Criterio	Valor		
	3	2	1
Tamaño de la flor o inflorescencia (longitudinal y/o transversal, se considera el menor).	> 3 cm	1-3 cm	< 1 cm
Color de la flor.	Cálidos (rojos, amarillos, naranjas)	Fríos (azul, morado)	Neutros (blancos y tonos pastel)
Abundancia de flores (número de flores simples o inflorescencias por planta).	> 10	5 a 10%	< 5
Periodo de floración (duración que permanece floreciendo la planta al año).	> 3 meses	1-3 meses	< 1 mes
Textura del follaje (hojas simples o compuestas cuyo tamaño es variable, vertical y horizontal, se considera el de menor tamaño).	Fina (< 2 cm)	Mediana (2-8 cm)	Gruesa (> a 8 cm)
Altura de la planta.	< 30 cm	30-100 cm	> 1 cm
Atracción de fauna silvestre (número de especies de insectos y aves que visitan sus flores durante el día).	Alta (> 3)	Media (2)	Poca (1)
Uso local en jardines.	Alto (común en jardines)	Medio (rara vez es utilizada)	No existe en jardines

Fuente: Tomado de Ramírez-Hernández *et al.*, 2012.

b) La valoración integral en el paisaje.

Finalmente, para llevar a cabo la revegetación en el derecho de vía considerando el paisaje, el ecosistema y la viabilidad de la especie para sobrevivir son los siguientes:

- Ubicación del predio dentro de la cuenca.
- Estructura de la vegetación (vertical y horizontal) en los remanentes de vegetación primaria o en la vegetación secundaria).
- Diversidad.
- Compactación del suelo.
- Fragmentación del paisaje.
- Distribución potencial de la especie.
- Salud forestal.
- Susceptibilidad ante actividades antropogénicas.
- Tener crecimiento rápido.
- Nula tendencia a adquirir una propagación invasora e incontrolable.
- Ser de fácil propagación (no es imperativo y queda a consideración del especialista y conforme a los objetivos de la obra).

- Tener alguna utilidad adicional a su efecto restaurador; por ejemplo, producir leña, carbón, forraje nutritivo, vainas comestibles, madera o néctar (no es imperativo y queda a consideración del especialista y de los objetivos de la obra).
- Que tiendan a favorecer el restablecimiento de las poblaciones de elementos de la flora y fauna nativas, proporcionándoles un hábitat y alimento (no es imperativo y queda a consideración del especialista y a los objetivos de la obra).

c) Otras consideraciones.

Para llevar a cabo la revegetación desde una óptica ornamental son las siguientes (Luz, 2001; Dunnett y Hitchmoug, 2004; Clément, 2007; Ignatieva, 2010):

- Seleccionar las especies de mayor impacto visual.
- Dar preferencia en la selección a las plantas de flores llamativas, frente a las gramíneas.
- Evitar especies muy diferentes en altura.
- Concentrarse en especies que puedan ser ornamentales por alguna razón particular.
- Concentrarse en aquellas especies que tengan elementos con cualidades estéticas especiales, como puede ser el tamaño, color o forma de las flores.
- Centrarse en un efecto 'minimalista', reduciendo la complejidad visual, generalmente seleccionando un número reducido de especies.

Para más detalle de las consideraciones de la revegetación se recomienda consultar el "Manual de revegetación y reforestación en la infraestructura carretera", elaborado por la Dirección General de Servicios Técnicos de la SICT (2021).

4.1.2 Especificaciones técnicas para terrazas en taludes de corte, terraplén y/o laderas

El diseño de una terraza considera 3 medidas:

- Espaciamiento entre terrazas.
- Sección transversal.
- Capacidad de almacenamiento y desagüe de las terrazas.

El cálculo del espaciamiento de las terrazas depende de la pendiente del terreno, también influye la precipitación, la sección transversal y el tamaño del terreno. En terrenos agrícolas, al ancho depende de los implementos agrícolas y el tamaño de la parcela.

De acuerdo con la sección transversal a construir se define el procedimiento para estimar el espaciamiento entre terrazas. Para las terrazas con secciones transversales de base angosta, base ancha y bancos alternos se utiliza el procedimiento que se presenta a continuación.

I. CÁLCULO DEL ESPACIAMIENTO ENTRE TERRAZAS DE BASE ANGOSTA.

El espaciamiento se puede medir utilizando la diferencia de nivel entre ellas, denominado intervalo vertical (IV) o considerando la distancia horizontal entre ellas, que se conoce como intervalo horizontal (IH) expresado en metros.

Generalmente el intervalo horizontal se mide sobre el terreno (distancia superficial), sobre todo en terrenos de poca pendiente, donde la diferencia entre el IH y la distancia superficial es mínima.

$$IV = 0.3 (a + P/b)$$

Donde:

IV= intervalo vertical en m.

P= pendiente en %.

Los valores de a y b son constantes, normalmente se asigna a=3 y b=2.

En terreno con pendientes altas debe utilizarse el IH, ya que la distancia superficial puede provocar errores considerables (Figura 4.3).

Para terrazas de base angosta se recomienda utilizar el valor de b=3, cuando la precipitación anual es menor a 1,200 mm y valor de b=4 cuando la precipitación es mayor a 1,200 mm anual.

La siguiente Tabla proporciona los valores de IV y IH de acuerdo con las precipitaciones para definir el espaciamiento entre las terrazas, de acuerdo con la precipitación y la pendiente del terreno.

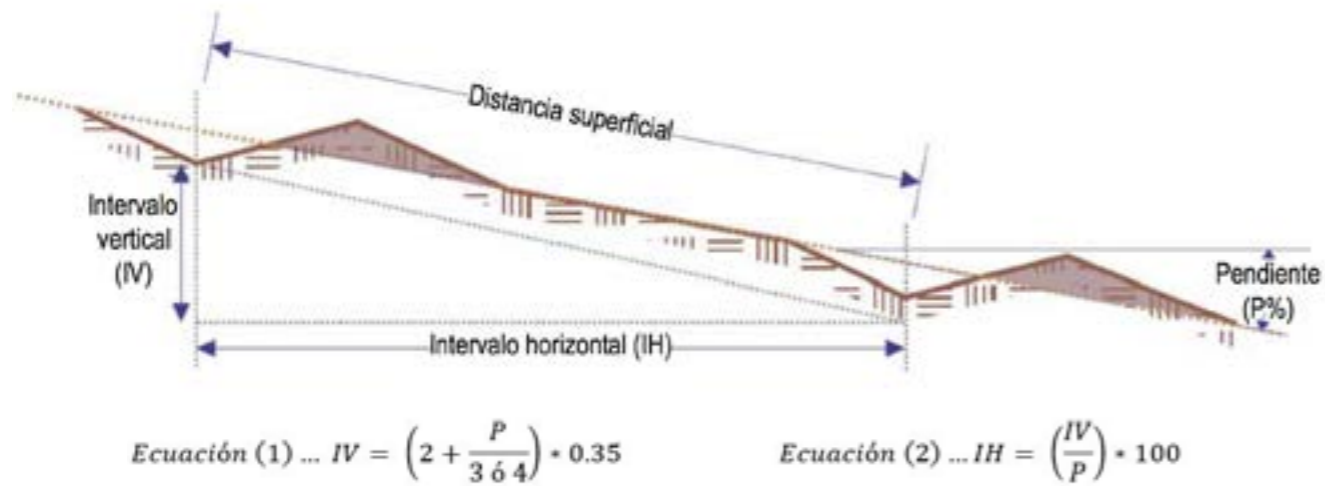
Tabla 4.2
Mediciones utilizadas para el espaciamiento entre terrazas.

Pendiente %	Precipitación (mm)				Pendiente %	Precipitación (mm)			
	< 1,200	> 1,200	< 1,200	> 1,200		< 1,200	> 1,200	< 1,200	> 1,200
	Intervalo vertical (m)		Intervalo horizontal (m)			Intervalo vertical (m)		Intervalo horizontal (m)	
2	0.81	0.76	40.5	38	22	2.84	2.28	12.9	10.36
4	1.02	0.91	25.5	22.75	24	3.05	2.44	12.7	10.16
6	1.22	1.07	20.33	17.83	26	3.25	2.59	12.5	9.96
8	1.42	1.22	17.75	15.25	28	3.45	2.74	12.32	9.78
10	1.62	1.37	16.2	13.7	30	3.66	2.9	12.2	9.67
12	1.83	1.52	15.25	12.66	32	3.86	3.05	12.03	9.53
14	2.03	1.68	14.5	12	34	4.06	3.2	11.94	9.41
16	2.24	1.83	14	11.43	36	4.27	3.35	11.86	9.3
18	2.44	1.98	13.55	11	38	4.47	3.5	11.76	9.21
20	2.64	2.13	13.2	10.65	40	4.67	3.66	11.67	9.15
					50	5.69	4.42	11.38	8.84

Fuente: Tomado de Rubio-Granados y Mario R. Martínez Menes, s.f.

Figura 4.3

Criterios para considerar al estimar las medidas de una terraza.



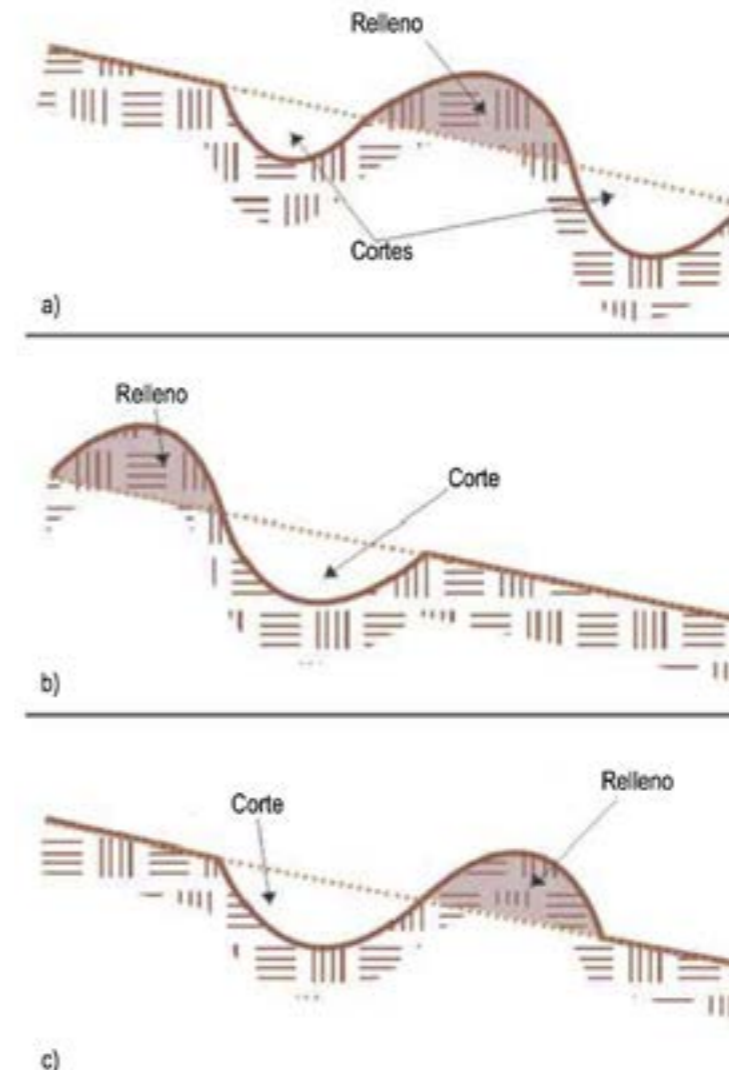
Generalmente el intervalo horizontal se mide sobre el terreno (distancia superficial), sobre todo en terrenos de poca pendiente donde la diferencia entre el IH y la distancia superficial es mínima. En terreno con pendientes altas sí debe utilizarse el IH, ya que la distancia superficial puede provocar errores considerables (ver Figura 4.4).

La definición de la disposición de la sección transversal requiere de los siguientes criterios:

- Al diseñar estas terrazas se debe definir la ubicación del banco de préstamo. El material puede obtenerse de la parte de aguas arriba o abajo bordo, o bien dividir los requerimientos del material tomando una parte de aguas arriba y otra de aguas abajo (ver Figura 4.5).
- La ubicación de los bancos de préstamo para construir los bordos de las terrazas y el cálculo de las dimensiones de los bordos (altura y profundidad).
- El banco de préstamo del material para la construcción del bordo puede venir a) de la parte de arriba, b) de la parte de abajo o c) tomar material del préstamo de ambos lados como se muestra en la siguiente Figura.

Figura 4.4

Esquemas de construcción de la sección transversal de una terraza y la utilización de materiales (de préstamo y/o de corte) como relleno de acuerdo con la condición del suelo.



a) Este procedimiento se recomienda cuando el suelo tiene más de 50 cm de profundidad. Este sistema favorece la capacidad de almacenamiento de la terraza.

b) Se recomienda cuando la precipitación no es muy alta.

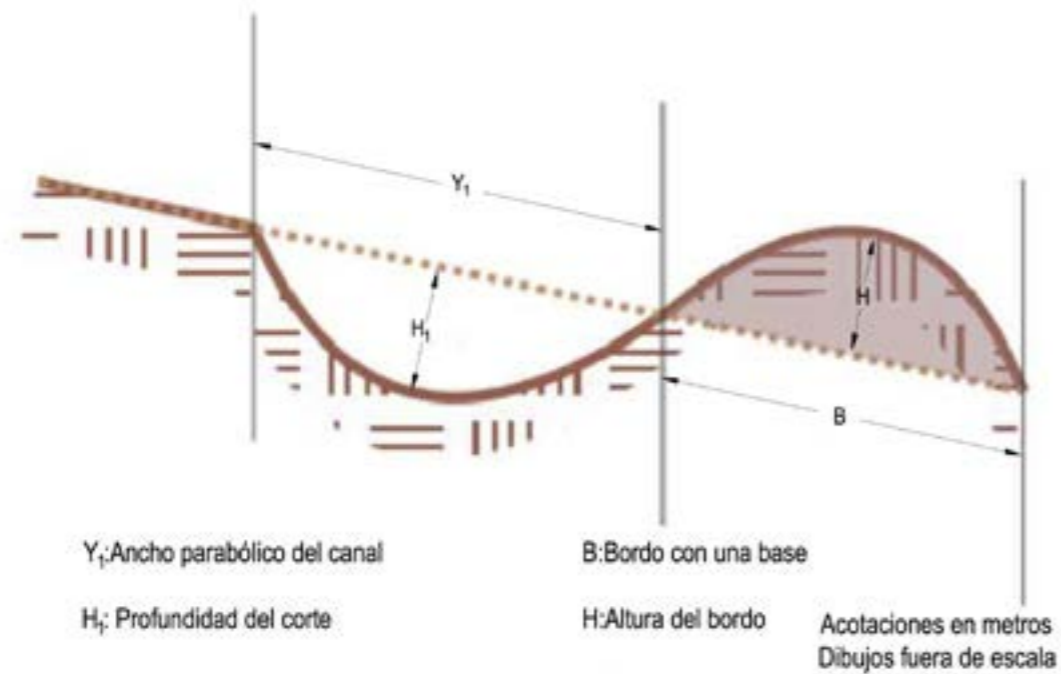
c) Se recomienda en suelos someros (leptosol o regosol). Este tipo de corte favorece la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

Asimismo, las dimensiones de la sección transversal de la terraza se describen con los siguientes elementos: ancho parabólico del canal (Y1), profundidad de corte (H1), bordo con una base (B) y altura del bordo (H).

Figura 4.5

Elementos geométricos de la sección transversal de una terraza.

Los bordos pueden ser parabólicos o trapezoidales y la relación entre la base y la altura es de 2 o 3 a 1. Esta relación se selecciona dependiendo del tipo de suelo y la capacidad de almacenamiento deseada. En el caso de los bordos tipo trapezoidal se recomienda una corona de 20 a 30 cm en función de su altura.



Con las dimensiones de la base y la altura del bordo o el canal se puede estimar el área de la sección transversal del canal y del bordo, que al multiplicarla por un metro de ancho se determina el volumen de relleno del bordo o corte del canal (m³/ml) y se multiplica por el largo de la terraza, obteniendo el volumen de corte y relleno de la terraza.

Las dimensiones propuestas para las terrazas se presentan en la siguiente Tabla.

Tabla 4.3 Dimensiones de la sección transversal de las terrazas de formación sucesiva y la capacidad de almacenamiento de agua.

Pendiente %	H	cm			Pendiente %	H	B	H1	Y1	Capacidad de almacenamiento	
		H	B	H1						I/m lineal	I/m lineal
1 a 5	40	80	90	100	45	90	20	180	160	1,413	695
		90	100	110						1,428	712
		100	110	120						1,443	728
	45	90	100	110	50	100	25	202	180	1,789	858
		100	110	120						1,805	877
		110	120	130						1,822	895
6 a 10	40	100	110	120	55	110	25	200	200	2,208	1,039
		110	120	130						2,227	1,059
		120	130	140						2,245	1,079
	45	80	90	100	45	90	20	180	160	765	559
		90	100	110						780	575
		100	110	120						795	592
50	90	100	110	50	100	25	202	198	969	690	
	100	110	120						985	708	
	110	120	130						1,002	726	
6 a 10	50	100	110	120	55	110	25	200	200	1,196	834
		110	120	130						1,214	855
		120	130	140						1,232	875

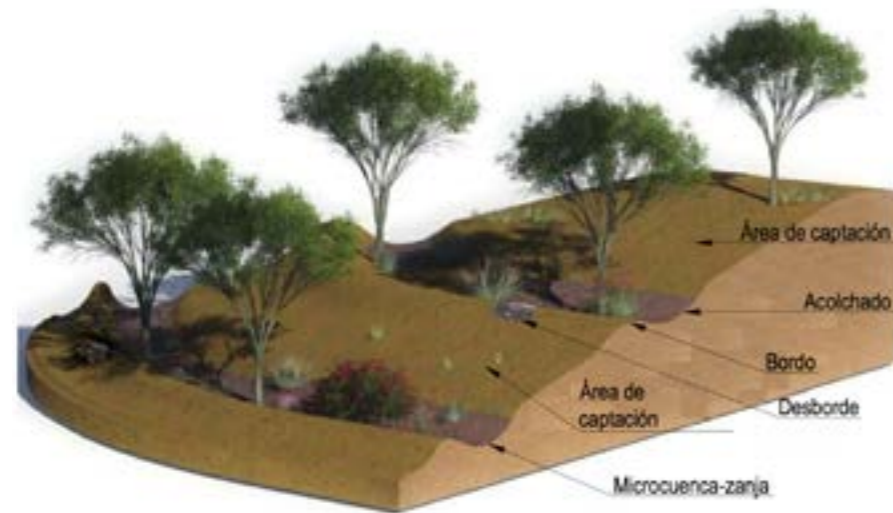
Fuente: Tomado de Sánchez-Bernal y Martínez-Menes, s.f.a.

Si se conocen los parámetros como pendientes, espaciamiento de las terrazas, lluvia máxima esperada para un periodo de retorno dado y coeficiente de escurrimiento, es posible calcular la capacidad de almacenamiento en litros por metro lineal.

Para su construcción, es recomendable determinar el volumen de almacenamiento necesario tomando en cuenta el área de la cuenca hidrológica ubicada aguas arriba, lo cual ayuda a estimar el volumen de agua que escurrirá desde la cuenca. Deben ser diseñadas de tal manera que puedan infiltrar la totalidad del escurrimiento pluvial en máximo 24 horas.

Las terrazas deben estar conformadas y cubiertas por vegetación, sobre todo en zonas con pendientes medias altas y donde el suelo sea potencialmente erosionable, en la siguiente imagen se muestra un diseño de éstas con vegetación.

Figura 4.6
Ejemplo de diseño de vegetación en terraza.



Fuente: Tomado de BDAN, 2017.

4.1.2.1 Consideraciones hidráulicas para el diseño de las terrazas

El diseño de las terrazas requiere conocer la descarga máxima (Q_{max}) de agua a través de los escurrimientos para calcular la máxima capacidad de almacenamiento de agua.

Además, es necesario utilizar modelos que relacionen las lluvias, los escurrimientos y las frecuencias de precipitación (periodos de retorno), para convertir la lluvia de diseño en caudal de diseño. Las terrazas se diseñan con base en la fórmula racional o por el Technical Release 55 software NRCS-USDA (TR-55). Para el diseño de la sección conductora de los escurrimientos excedentes no es necesario la generación de hidrogramas, sólo basta el caudal máximo para un determinado periodo de retorno.

Para el diseño hidráulico de las terrazas se deberá considerar lo siguiente:

El tiempo de concentración (T_c) de una cuenca, es el tiempo que demora en llegar el escurrimiento que se genera en la parte más alejada de la cuenca más remota, hasta el punto de salida en la cuenca analizada. El tiempo de recorrido (T_t) es un componente del tiempo de concentración (T_c), y una de las formas más racionales de calcular este último, es a través de las sumas de todos los tiempos de recorridos desde el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca hasta el punto de interés o salida de la cuenca.

Se utilizan principalmente fórmulas empíricas para calcular este tiempo, entre ellas:

$$T_c(\text{min}) = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right) 0.385$$

Donde:

L = longitud del flujo directo en km.

H = es la máxima diferencia de cotas entre el punto más alto y la salida de la cuenca en m.

El tiempo de recorrido T_t es la relación entre la longitud total del flujo desde la parte más lejana de la cuenca y la velocidad promedio de dicho flujo:

$$T_t(\text{horas}) = \frac{(0,28 L)}{(V)}$$

El tiempo de concentración T_c es la suma de los T_t valores de recorrido de los varios segmentos consecutivos de flujo:

$$T_c = T_{t1} + T_{t2} + T_{tm} (3)$$

Donde:

T_t = tiempo de recorrido (horas).

L = longitud total del flujo (km).

V = velocidad promedio del flujo (m/s).

N = número de segmentos o tramos de flujo.

Para la velocidad del agua (V) se pueden utilizar los valores de la siguiente Tabla:

Tabla 4.4
Guía para estimar la velocidad del agua.

Pendiente de cauce de agua m/m	Velocidad media en m/s
0.002	0.2
0.005	0.3
0.01	0.5
0.02	0.6
0.03	0.85
0.04	1
0.05	1.1
0.06	1.2

Fuente: Tomado de Kirpich, 1940. *Time of concentration of small agricultural watersheds*.

Finalmente, para el cálculo de la descarga máxima es posible utilizar el método racional, que es una fórmula empírica en función del coeficiente de escurrimiento (C) y cuya determinación puede ser algo subjetiva. La ecuación tiene valores probados para cuencas pequeñas (120 hectáreas) y algunos han probado su validez hasta las 400 hectáreas.

La ecuación o modelo racional es la siguiente:

$$Q_{max} = 0,0028 * C * I_{tc} * A$$

Donde:

C = coeficiente de escurrimiento.

I_{tc} = máxima intensidad de lluvia en mm/hora para un tiempo igual al tiempo de concentración de la cuenca y un determinado periodo de retorno.

A = área de la cuenca vertiente en Ha.

Q = máxima descarga en m^3/s para el periodo de retorno seleccionado para i .

Tabla 4.5
Para el coeficiente se puede obtener un valor en función del tipo de suelo, su uso y su pendiente.

Pendiente	Suelos livianos	Suelos medios	Suelos pesados
Bosque			
0-5 %	0.10	0.30	0.40
5-10 %	0.25	0.35	0.50
10-30 %	0.30	0.50	0.60
Pastizal			
0-5 %	0.10	0.30	0.40
5-10 %	0.15	0.35	0.55
10-30 %	0.20	0.40	0.60
Cultivos			
0-5 %	0.30	0.50	0.60
5-10 %	0.40	0.60	0.70
10-30 %	0.50	0.70	0.80

Fuente: Tomado de Rubio-Granados y Martínez-Menes, s.f.b

Para la intensidad de la lluvia se puede utilizar la expresión:

$$i = \frac{232.56 * T^{0.181}}{t^{0.563}}$$

Donde:

I = intensidad de la lluvia (mm/h).

T = periodo de retorno en años.

t = duración en minutos.

Para las consideraciones de los canales de interceptación y desagüe, éstas dependerán de su forma.

Finalmente, la zona de las terrazas debe ser revegetada con especies arbóreas secundarias que puedan crecer bajo condiciones ambientales limitantes. También se requiere que tengan raíces pivotantes (con un eje principal) que penetre a profundidad y forme raíces secundarias, su porte debe ser bajo para no añadir peso a la estructura. En los climas templados una especie que cumple con estas características es el tepozán (*Buddleja cordata*), también se pueden utilizar individuos de junípero (*Juniperus depeana*), aile (*Alnus sp.*) y colorín (*Erythrina sp.*), por mencionar algunos. Los espacios entre las terrazas pueden ser cubiertos con pastos amacoyados nativos pertenecientes al género *Muhlenbergia*, muy resistentes a condiciones ambientales secas. No se recomienda colocar árboles de porte alto.

4.1.3 Especificaciones técnicas para cunetas verdes

4.1.3.1 Consideraciones para el diseño de cunetas verdes

Para el diseño de las cunetas verdes se debe tener en cuenta la localización, los requerimientos del suelo, la vegetación, la configuración general del canal y su construcción tal como se muestra en la siguiente Tabla:

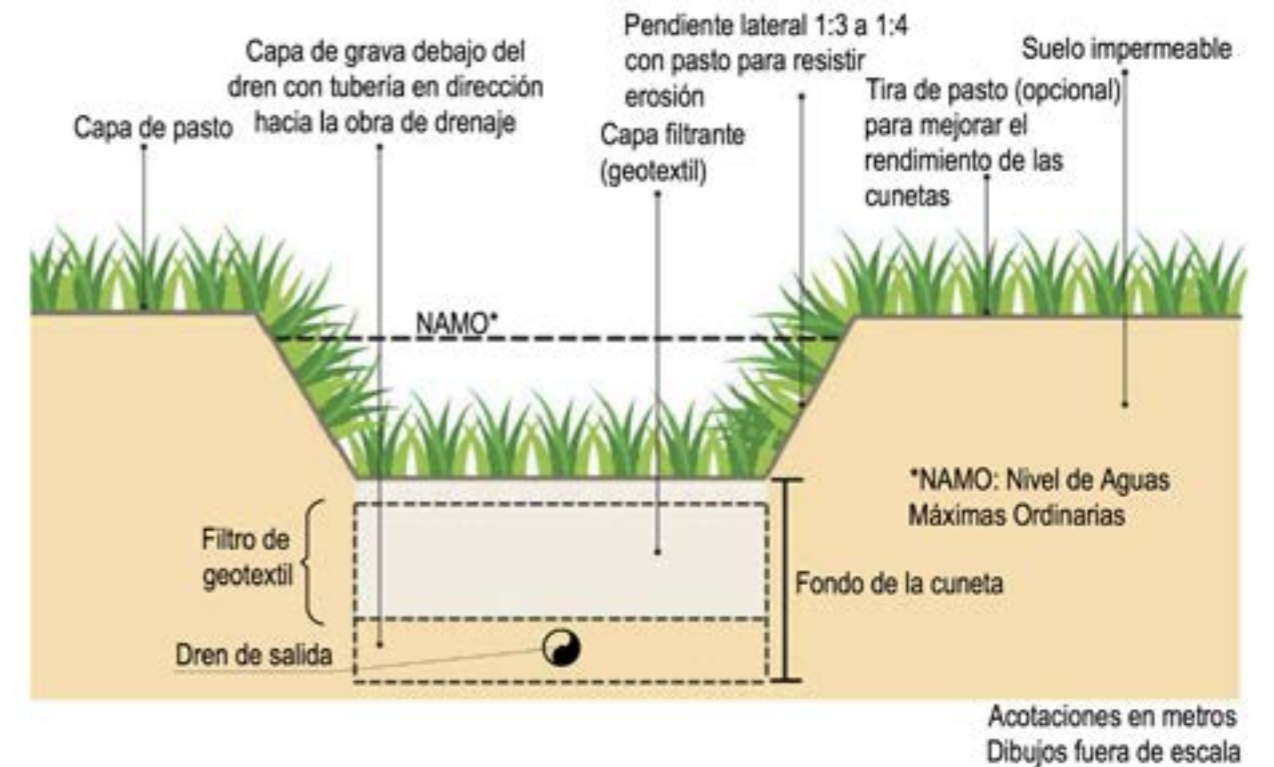
Tabla 4.6
Análisis del lugar donde se pondrá la cuneta.

Tipo de información		Utilidad
Topografía	Pendiente.	Esta información permite descartar el uso de algunas tipologías de sistemas urbanos de drenaje sostenible). Por ejemplo pendientes abruptas o zonas propensas a deslizamientos.
Suelo	Tipo de suelo.	Necesaria para conocer y caracterizar los procesos de infiltración y subsecuentemente la calidad del agua que se infiltra.
Hidrología	Patrones de flujo.	Conocer las condiciones a las que la infraestructura trabajará, niveles de excedencia, flujos máximos, etc.
Hábitat y vegetación	Tipo de vegetación. Normatividad.	La vegetación y el hábitat nativo deben ser protegidos y deben conocerse la normativa y leyes que los protegen.
Uso de tierra	Densidad permitida.	Esto permite determinar las actividades contaminantes y la identificación de actores que intervienen en el manejo de aguas superficiales.
	Actividades . Conexiones disponibles .	
Localización de las descargas	Tipo de corriente receptora.	Control de calidad y cantidad de la esorrentía.

Fuente: Modificado de Claros-García, 2016.

Por lo general, deben diseñarse como una sección transversal trapezoidal o parabólica, ya que son las más fáciles de construir y mantener, y éstas deben ofrecer un buen rendimiento hidráulico (facilidad de transporte del agua en la infraestructura). Las pendientes laterales deben tener una proporción de entre 1:4 o 1:3 para evitar la erosión y el posible colapso del talud de la cuneta.

Figura 4.7
Esquema general de una cuneta.



Fuente: Modificado de Woods-Ballard et al., 2015.

El fondo de la cuneta debe diseñarse de 0.5 a 2.0 m, aunque se pueden utilizar canales más estrechos o anchos. Este fondo debe permitir un tratamiento de calidad de agua adecuado y de flujo poco profundo al tiempo que evita que los flujos se concentren y se formen canales preferenciales que ocasionen erosión. Cuando el fondo de la cuenta es grande (mayor a 2 m) existe el riesgo de que los flujos se concentren, por lo tanto, es necesario dividir la sección transversal, utilizando un dren (Figura 4.7). Para anchos totales de cuneta mayores a 2 m donde el ancho del flujo puede generar tubificación del flujo, se debe considerar la necesidad de dividir la sección transversal con un divisor, utilizando un separador en la entrada de la cuneta.

Las pendientes longitudinales deben estar en un intervalo de 0.5 a 6%. Cuando se manejan pendientes superiores a 3% se deben incorporar presas de control. En este caso, el intervalo se amplía hasta 10% y se debe considerar el uso de alfombras de refuerzo permanente, ya que las velocidades pueden estar por encima de las recomendadas para diseños estándar. Cuando se tienen pendientes menores a 1.5% se pueden diseñar desagües subterráneos o diseñar cunetas húmedas.

A continuación se presentan algunas de las características más relevantes para el diseño de las cunetas verdes.

Tabla 4.7
Características relevantes para el diseño de cunetas verdes.

Parámetro	Características
Velocidad de flujo.	< 0.3 m/s
Espacio requerido.	5-10% área total
Área de drenaje.	< 20000 m ²
Pendiente.	2-10%
Distancia al nivel freático.	< 1.5 m – requiere uso de drenaje. > 1.5 m – no requiere drenaje.
Ancho de la base.	0.6-2.4 m
Coefficiente de Manning.	0.2-0.3
Longitud máxima.	30 m
Tiempo mínimo de retención.	9-18 min
Profundidad de flujo.	< 0.3 m
Tasa de infiltración.	7-12 mm/h > 12 mm/h requiere drenaje.
Pendientes laterales.	1-2.5%

Fuente: Tomado de Claros-García, 2016.

Las cunetas verdes pueden trabajar integralmente con otras estructuras, como pavimentos permeables, y aumentar su capacidad de tratamiento e intercepción, además de ser parte integral de un sistema de drenaje que puede dar el servicio de pretratamiento para una cuenca de infiltración, humedal o cuenca de retención (sistemas lineales o interconectados).

4.1.3.2 Consideraciones hidráulicas para el diseño de las cunetas verdes

Así como los canales abiertos, el diseño de una cuneta verde debe considerar un equilibrio entre el almacenamiento, el tratamiento y la infiltración durante las pequeñas tormentas, además que incluyan el transporte de flujo máximo durante grandes eventos de precipitación.

También el diseño debe tener en cuenta las siguientes consideraciones hidráulicas.

- I. La cuneta debe tener la capacidad adecuada para transportar y/o almacenar el evento del periodo de retorno de diseño (nivel de servicio adecuado). Cabe

señalar que las cunetas húmedas tienden a no recuperarse tan rápido con los eventos de precipitación altos, por lo que el nivel de servicio debe tomar en cuenta esta consideración.

Para calcular la velocidad promedio de flujo en una cuneta (aplica igualmente para canales vegetados u otras estructuras de Infraestructura Verde Vial de transporte), se debe usar la ecuación de Manning.

$$Q = (AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}) / n$$

Donde:

Q = caudal (m³/s).

n = coeficiente de Manning, un coeficiente de rugosidad que depende de las características del canal ($m^{-1/3s}$).

S = pendiente total del canal (m/m).

R = radio hidráulico = A/P , donde A es el área de la sección transversal (m²) y P es el perímetro del canal que se mantendrá mojado (m).

El valor “n” de Manning, o el “coeficiente de rugosidad” indica hasta qué punto la superficie del canal resistirá el flujo, y es fundamental en su tamaño. El coeficiente varía con el tipo de cubierta vegetal y la profundidad del flujo. Este coeficiente deberá aumentarse para las cunetas que incluyen plantas más grandes y/o una mayor variedad de tamaños de plantas.

Será necesario estimar el valor “n” promedio de Manning para los flujos por encima de la hierba, dependiendo de la profundidad del flujo. Las presas o cuencas de control y los sistemas de pretratamiento se pueden utilizar para mejorar el rendimiento tanto hidráulico como de la calidad del agua.

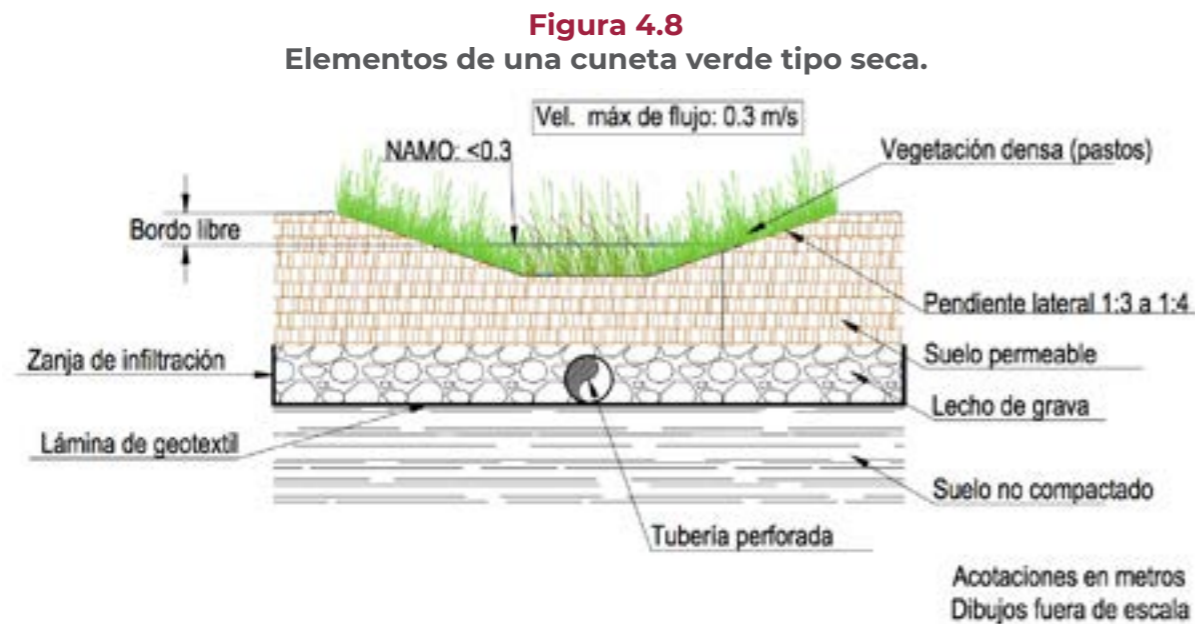
- II. La cuneta debe tener la capacidad de transportar y conducir de manera segura los flujos de eventos extremos a las áreas de almacenamiento de flujo de excedencia, vías de conducción secundarios o alcantarillado. Las velocidades de flujo para eventos extremos deben mantenerse por debajo de 1.0 m/s (o 2.0 m/s si la estabilidad de la pendiente, la erosión del suelo y las condiciones de seguridad lo permiten) para evitar la erosión.
- III. Los volúmenes de escorrentía de diseño deben estar drenados casi por completo en 24 horas. Esto ayudará a garantizar que los volúmenes de almacenamiento y tratamiento estén disponibles para eventos posteriores y, en el caso de las cunetas secas, cuidar que la vegetación no sufra daños durante las condiciones de saturación.

4.1.3.3 Consideraciones para el diseño por tipo de cuneta verde

I. CUNETAS SECAS.

Las cunetas secas deben presentar canales vegetados que disponen de un lecho filtrante (Figura 4.8) formado por un material muy permeable que permite que todo el volumen de agua se infiltre a través del fondo del canal.

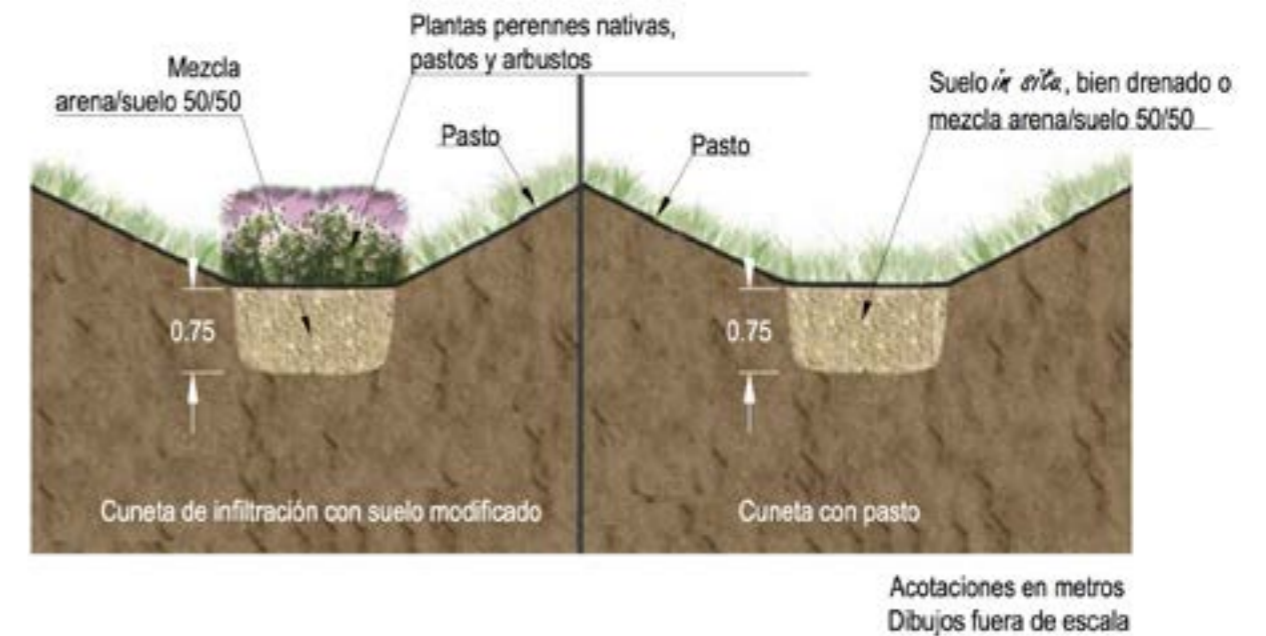
En la siguiente Figura se ilustra la conformación de una cuneta seca.



Las cunetas secas (con césped o de infiltración) son apropiadas en suelos que son bien drenados hasta moderadamente drenados. Es decir, suelos con textura gruesa a media. Se recomienda evaluar la conductividad hidráulica de los suelos, la cual debe de ser de 40 cm/día (Ver Anexo D).

Para su conformación, en un suelo *in situ* bien drenado se deberá usar una mezcla 50:50 arena-suelo, el recubrimiento de la vegetación puede ser con pastos o se pueden usar plantas tolerantes a las sequías, tal como se muestra en la siguiente Figura.

Figura 4.9
Imagen de una cuneta verde tipo seca y el manejo del uso de suelo y la vegetación.



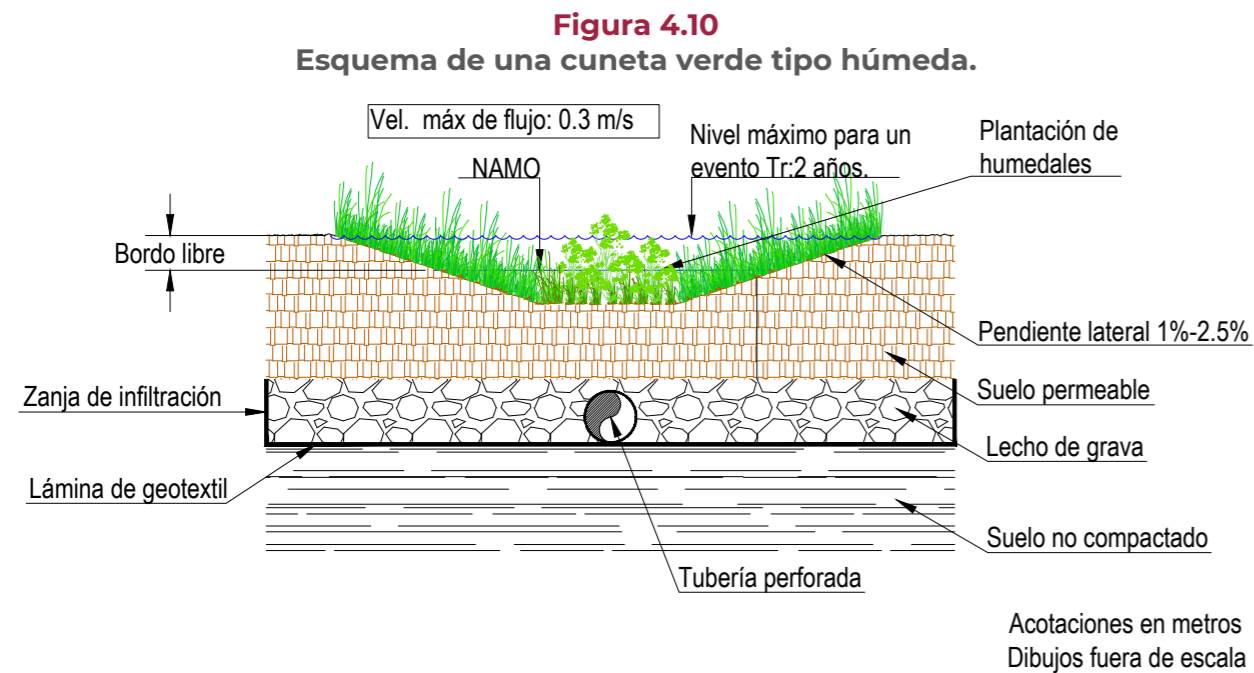
Este tipo de cunetas también puede tratar la escorrentía residual (inmediatamente después de un evento de precipitación), tomando en cuenta las siguientes consideraciones (Woods-Ballard *et al.*, 2015):

- Los sedimentos de gruesos a medianos y los contaminantes asociados (como nutrientes, aceites/grasas libres y metales) pueden eliminarse mediante filtración a través de la vegetación de la superficie y la cubierta vegetal.
- Las partículas finas y los contaminantes asociados se pueden eliminar mediante la infiltración a través del suelo subyacente y/o las capas del medio filtrante. Esto proporciona tratamiento por filtración, eliminación de contaminantes disueltos por absorción al medio filtrante y cierta absorción biológica por la vegetación y la biota del subsuelo.
- Los contaminantes orgánicos se pueden eliminar mediante degradación, fotólisis y volatilización.

II. CUNETAS HÚMEDAS.

La capacidad de transporte (nivel de servicio) de las cunetas húmedas se puede determinar utilizando el mismo enfoque que para las cunetas tipo secas. El requisito de restringir las velocidades para el evento de tratamiento de la calidad del agua para garantizar una filtración vegetativa adecuada normalmente no será relevante, ya que las pendientes longitudinales menos profundas (o gradiente cero) asociadas con los canales húmedos garantizarán tiempos de retención adecuados.

En la siguiente imagen se ilustra la conformación de una cuneta tipo húmeda.



Fuente: Modificado de Woods-Ballard et al., 2015.

Las cunetas húmedas deben cumplir con las siguientes consideraciones particulares:

- La profundidad del flujo equivalente a el Nivel de Agua Máximo de Operación (NAMO) debe mantenerse por debajo de la altura de la vegetación (es decir, generalmente < 1 cm).
- La velocidad máxima de flujo en la cuneta para tal evento debe ser de 0.3 m/s para asegurar una filtración de escorrentía adecuada.
- El tiempo de viaje de la escorrentía a lo largo del canal (tiempo de residencia = longitud/velocidad) debe ser de al menos 9 minutos (18 minutos desde la parte superior del canal, si el canal tiene entradas laterales a lo largo de su longitud).
- Se debe incluir un tratamiento previo para evitar la rápida acumulación de sedimentos en las superficies de los humedales pantanosos (que es más difícil de eliminar) y para garantizar que las áreas de agua permanente no reciban escorrentías contaminadas.
- Una profundidad mínima de agua de 150 mm suele ser apropiada para proteger la vegetación de los humedales de los flujos erosivos y mantener una adecuada resistencia del sistema a la sequía.
- Las profundidades máximas del agua deben basarse en cada sitio, teniendo en cuenta tanto los criterios técnicos, de servicios (incluida la seguridad) como de biodiversidad.

Para la construcción de las cunetas húmedas se recomienda usar suelos de textura fina o arcillosa, en donde la conductividad hidráulica sea muy baja (< 10 cm/día). En el caso de que los suelos nativos sean poco permeables se debe colocar una capa de arcilla compacta en la base. Las plantas deben ser aptas para resistir la humedad, tal como se muestra en la siguiente Figura.

Figura 4.11
Imagen de una cuneta verde tipo húmeda. A la izquierda se muestra una mezcla de suelo mejorado para lograr la retención mientras que en la imagen derecha se observa un suelo nativo de tipo arcilloso.



En suelos arcillosos, las partículas finas se pueden eliminar por adsorción y sedimentación. Asimismo, los nutrientes y los metales disueltos se pueden eliminar mediante la biodegradación y la absorción de las plantas.

La vegetación en la cuneta húmeda debe mantenerse a una altura de 7.5 a 15 cm para evitar que se aplaste durante los eventos de flujo (o utilizar vegetación adecuada que resista más carga de nivel). La vegetación utilizada debe tener la capacidad de remover contaminantes en todos los eventos de escorrentía, incluidos los eventos extraordinarios que ocurren una vez al año.

La vegetación que se emplee en estas cunetas debe consistir en una densa y variada selección de plantas tolerantes a estar inmersas en agua frecuentemente, además de ser de rápido crecimiento. En la selección de las especies deberán tomarse en cuenta los siguientes puntos:

- Las condiciones del suelo o tecnosol.
- El clima, las plantas deben ser lo suficientemente resistentes para soportar las condiciones meteorológicas más extremas que se produzcan en la región.
- Topografía, la vegetación debe ser capaz de soportar la fuerza del agua que dependerá de la pendiente del suelo.

- La luz solar disponible.
- Además, la vegetación secundaria debe cumplir con los siguientes criterios:
 - Tener un sistema radical profundo o formar una capa de césped densa para resistir la escorrentía.
 - Ser plantas de crecimiento vigoroso.
 - Ser tolerantes a las inundaciones y poder sobrevivir y seguir creciendo después del periodo de inundación.
 - Se recomienda el uso de vegetación nativa de la región.

4.1.4 Especificaciones técnicas para franjas filtrantes

Los parámetros de diseño de las franjas filtrantes están enfocados principalmente en mejorar la calidad del agua (en particular, tratar y manejar los sedimentos que pueden dañar el rendimiento de otras estructuras de la Infraestructura Verde Vial aguas abajo). El rendimiento de la franja filtrante dependerá principalmente de su longitud y ésta deberá ser paralela en la dirección del flujo. Las franjas filtrantes permitirán niveles bajos de infiltración, por lo que siempre que los suelos entre la franja filtrante y el agua subterránea proporcionen una protección adecuada del agua subterránea y el suelo de la franja filtrante tenga un contenido orgánico y de arcilla apropiado, los riesgos de contaminación del agua subterránea deberían ser aceptables (Woods-Ballard *et al.*, 2015).

Los principales criterios de diseño de franjas filtrantes se presentan en la siguiente Tabla.

Tabla 4.8
Criterios de diseño de las franjas filtrantes.

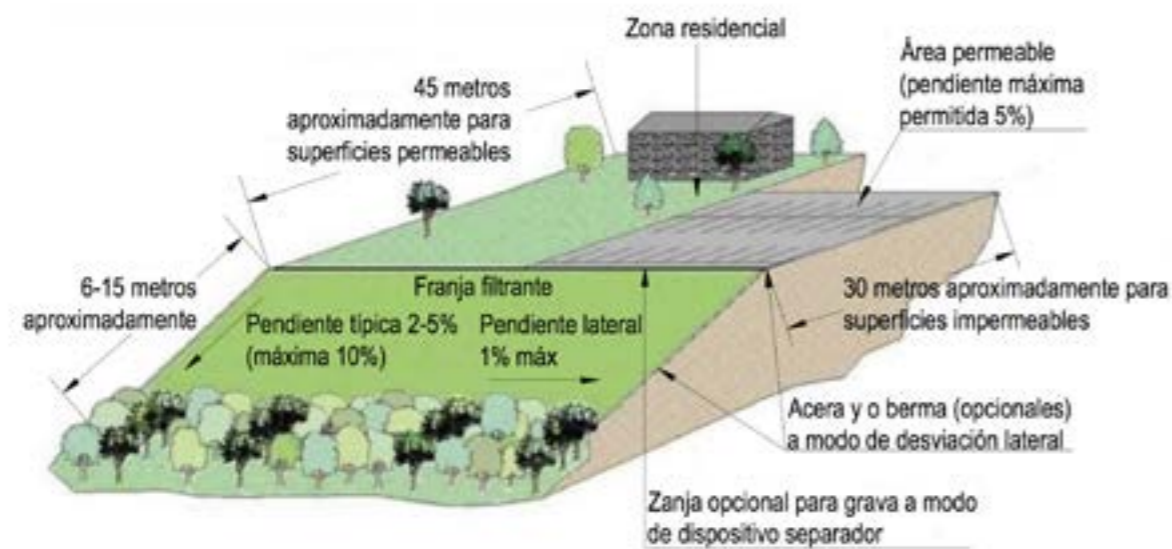
Parámetro de diseño	Criterio
Área drenante	No hay área de drenaje mínimo requerido. El área de drenaje máxima estará limitada por la velocidad y la profundidad de flujo.
Tormentas de diseño	En Estados Unidos de América se calcula para tormentas con un periodo de retorno de 6 meses y duración 24 horas. Sin embargo, para diseños actuales se utilizan periodos de retorno más amplios (hasta 10 años).
Calado medio de diseño	Inferior, a menos de 12.70 mm para la condición de flujo laminar.
Velocidades máximas	Menor a 0.30 m/s y menor a 0.9 m/s en casos de picos de descarga de una tormenta para periodos de retorno de 10 años.
Tiempo hidráulico de residencia	El óptimo es superior a 9 minutos siendo el mínimo igual a los 5 minutos.
Pendiente máxima	15% es la pendiente máxima admisible, pero es preferible que esté entre el 2% y el 5%.

Parámetro de diseño	Criterio
Longitud de la franja (en el sentido del flujo) necesaria para el tratamiento	Se determina en función de la eliminación de los sólidos en suspensión requerida.
Longitud mínima de la franja filtrante	Se recomiendan unos 6 metros en la dirección del flujo de agua.
Longitud máxima de la franja filtrante	Las franjas filtrantes no están limitadas por una longitud máxima para proporcionar beneficios estéticos o en lo referente a mejoras de hábitats. Sin embargo, para la evaluación de la efectividad de las franjas filtrantes en el tratamiento de calidad de agua, se consideran solamente los primeros 76 metros. Longitudes superiores son propensas a producir la concentración del flujo que puede originar erosión.
Ancho mínimo de la franja filtrante	El ancho mínimo de la franja será $0.2 \times L$, (donde L es la longitud de la trayectoria de flujo superficial sobre las áreas impermeables situadas aguas arriba) o 2.4 metros, lo que sea mayor.
Forma de la pendiente de la franja filtrante	La pendiente debe ser plana o tener forma convexa para que la lámina de agua no tenga tendencia a concentrarse y canalizarse.
Distribución de la escorrentía sobre la franja filtrante	El borde del área drenante debe ser plano/convexo y tener la pendiente adecuada para proporcionar un flujo laminar, en caso de que no se produzca habrá que construir dispositivos de difusión en la entrada a la franja filtrante.
Estabilización	El suelo de las franjas filtrantes ha de ser estabilizado con vegetación antes de su funcionamiento para evitar erosiones. Se debe preservar la vegetación existente (donde la haya), y mantener el crecimiento natural. En áreas problemáticas con pendientes superiores de 4:1 se deben utilizar geotextiles protectores de la erosión en las fases previas a la plantación y durante la misma.
Pretratamiento	En algunos casos (cuando se prevea un arrastre importante de materiales desde las áreas contribuyentes) se necesitará disponer de un elemento donde se facilite la sedimentación antes de la entrada del flujo a franja filtrante.

Fuente: Modificado de <http://sudsostenible.com>

4.1.4.1 Consideraciones hidráulicas para el diseño de las franjas filtrantes

Mantener el flujo laminar sobre la franja filtrante es esencial y se puede lograr de manera efectiva. Las franjas filtrantes deben diseñarse con una pendiente longitudinal mínima (es decir, una pendiente a lo largo de la dirección del flujo) del 1% para evitar encharcamientos (Figura 4.12) y una pendiente máxima del 5% para evitar la canalización del flujo. La parte superior e inferior de la pendiente deben estar en el extremo inferior del rango de pendiente permisible para reducir las velocidades de flujo y así reducir el riesgo de erosión. Cuando las pendientes de las franjas filtrantes son mayores a 5%, se puede usar una serie de esparcidores de nivel para mantener el flujo laminar mientras la escorrentía fluye sobre la franja (Woods-Ballard *et al.*, 2015).

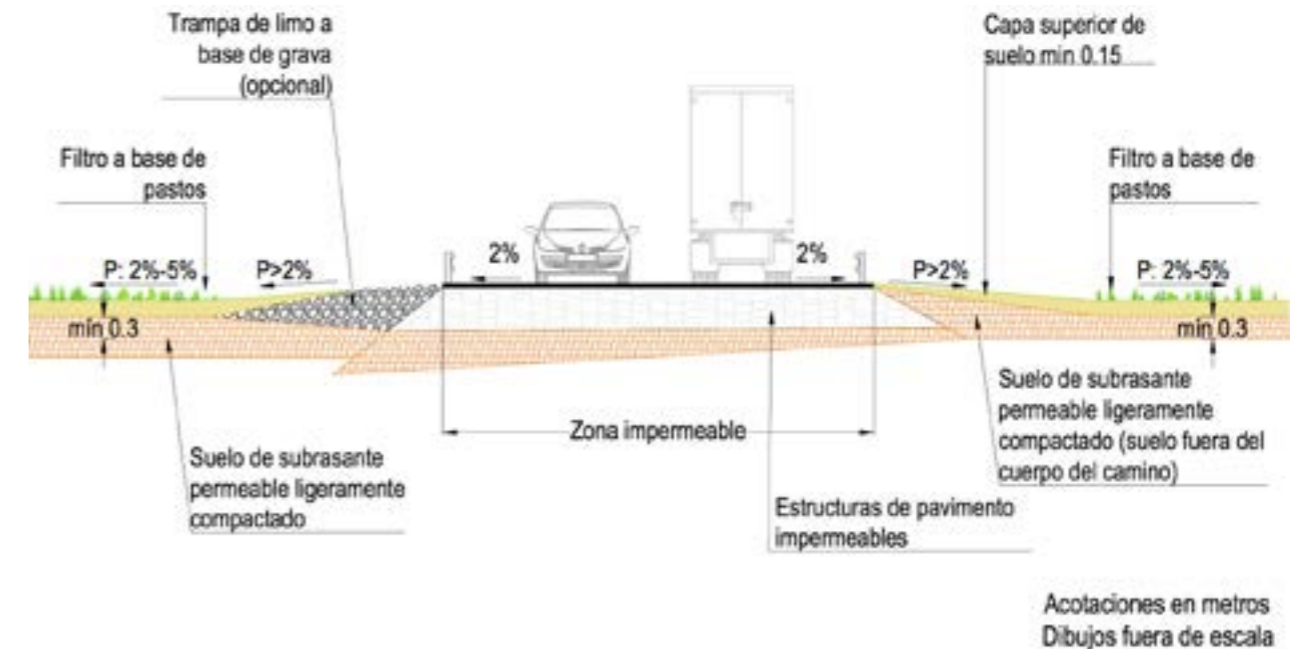
Figura 4.12**Consideraciones hidráulicas para el diseño de una franja filtrante.**

Fuente: Tomado de <http://sudsostenible.com/aplicaciones-de-las-franjas-filtrantes-y-consideraciones-en-su-uso/>

La longitud máxima del área impermeable que drena a las franjas filtrantes debe controlarse para reducir el riesgo de flujos concentrados, aunque esto también dependerá de la pendiente del área impermeable y de la efectividad de las técnicas de dispersión del flujo adoptadas. Las longitudes de las franjas filtrantes tienden a estar determinadas por los objetivos del tratamiento.

Se recomiendan velocidades máximas de flujo a través de las franjas filtrantes de 1.5 m/s para evitar la erosión durante los flujos (se debe tener en cuenta que, si la función de la franja filtrante es el tratamiento del agua, requiere una velocidad más baja). En este sentido, se recomienda el uso de aceras o bermas laterales para que no se presente flujo lateral entre diferentes franjas. La ecuación de Manning se puede utilizar para diseñar la franja filtrante para las velocidades de flujo de diseño.

En la siguiente Figura se ilustra la conformación de una franja filtrante.

Figura 4.13**Esquema de una franja filtrante.**

Fuente: Modificada de Woods-Ballard et al., 2015.

4.1.4.2 Consideraciones para el diseño en el tratamiento y calidad de agua

Las dimensiones de las franjas filtrantes mayores a 2.5 m (idealmente 3 m) son cruciales cuando las pendientes están limitadas al 1%, particularmente debido a que son necesarias para proteger la funcionalidad de los componentes aguas abajo (es decir, como componente de pretratamiento); y se ha demostrado que las longitudes mayores a 5 m son muy eficaces en términos de rendimiento de la calidad del agua (Barrett et al., 2004), incluso para pendientes más pronunciadas, aunque la densidad de la vegetación es un factor importante.

Un estudio de franjas de filtrantes realizado por Caltrans (2003) encontró que cuando las pendientes son menores al 10% y la cobertura vegetal excede el 80%, entonces se logra una concentración irreducible en una franja de menos de 5 m, es decir, una franja más larga solo se requiere cuando hay pendientes mayores al 10%. Con una pendiente del 20%, se sugiere que se proporcione una franja filtrante de 1 m de longitud por cada 6 m de longitud de trayectoria de flujo de área impermeable (Figura 4.13).

Las investigaciones han demostrado que las franjas filtrantes ayudan a la eliminación constante de los sólidos totales en suspensión y de los metales pesados totales, y con frecuencia también de los metales disueltos cuando los diseños se ajustan a los criterios establecidos anteriormente. Sin embargo, las eficiencias de eliminación son variables, por lo que las franjas filtrantes siempre deben usarse junto con los componentes del tratamiento aguas abajo.

Se requiere un buen desempeño de remoción de contaminantes para todos los eventos de escorrentía que ocurren en promedio una vez al año. La duración de este evento debe ser la duración crítica relevante para el caudal de la franja filtrante. Si ésta

está drenando una carretera, es probable que 15 minutos sean apropiados. Para este evento de diseño de calidad del agua se tienen las siguientes consideraciones:

- La profundidad del flujo debe ser menor que la altura de la vegetación y, por lo tanto, debe limitarse a aproximadamente 100 mm de profundidad para mantener buenos niveles de filtración.
- La velocidad máxima de flujo debe ser inferior a 0.3 m/s para promover el asentamiento de partículas.
- El tiempo de recorrido de la escorrentía a través de la franja del filtro (tiempo de residencia = longitud/velocidad) debe ser de al menos 9 minutos.

La ecuación de Manning se puede utilizar para respaldar el diseño de la franja filtrante, como se indica en la siguiente ecuación:

$$V = \frac{d^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

Donde:

V = velocidad media de flujo transversal (m/s).

d = profundidad de flujo (m).

S = pendiente longitudinal de la franja filtrante (es decir, en la dirección del flujo) (m/m).

n = coeficiente de rugosidad "n" de Manning ($m^{-1/3} s$).

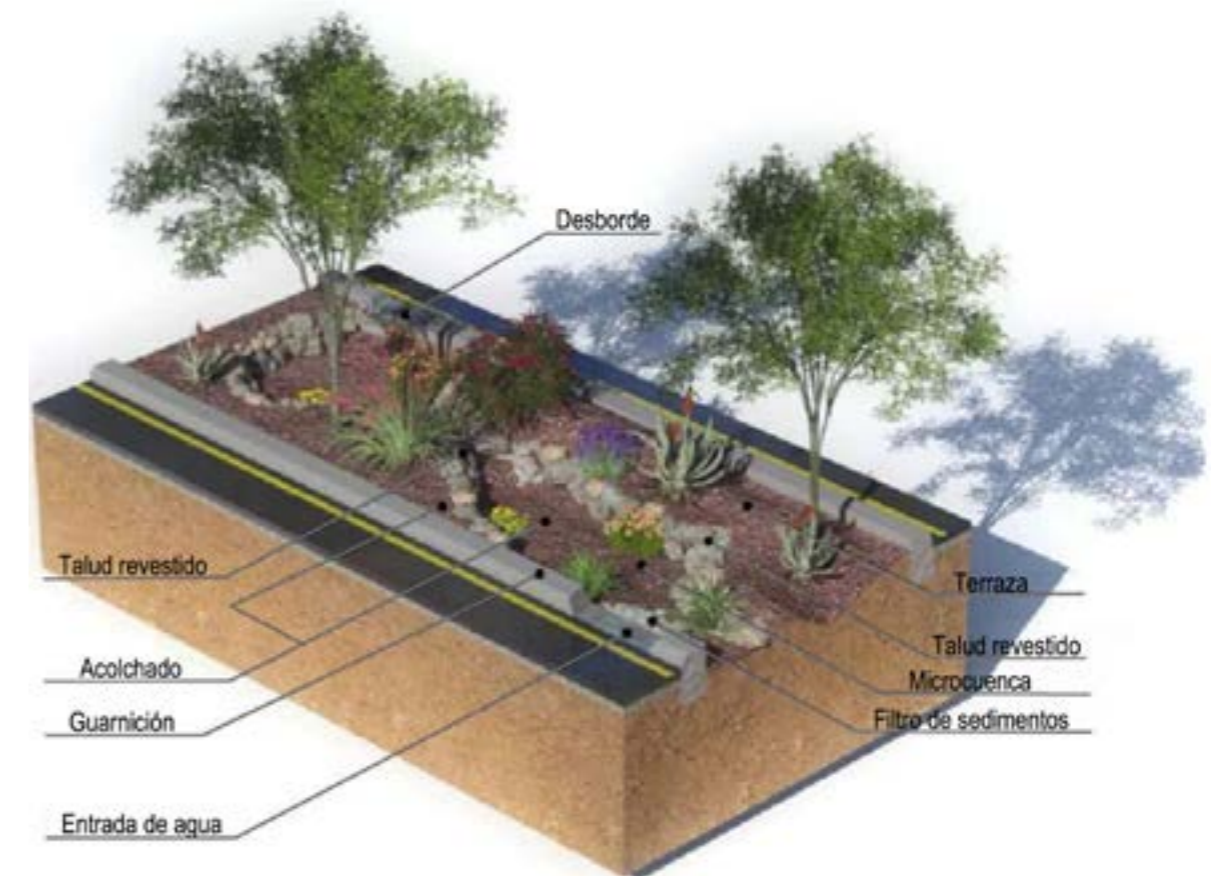
Finalmente, en términos de suelo, aunque las franjas filtrantes pueden ser utilizadas en la mayoría de los lugares, hay que tener en cuenta que los suelos arcillosos y otros más de tipo impermeable limitan la efectividad del tratamiento de la escorrentía. Para aumentar la permeabilidad se puede modificar la porosidad del suelo, al menos incluir una mezcla de *mulch* de madera envejecida gruesa de 5 a 10%, grava o arena (< 1 mm) entre 20 y 30% y suelo local. También se pueden incorporar pequeños desagües que ayuden a sacar el agua después de una lluvia muy intensa. Lo idóneo es que la capa superior del suelo, sobre el que se construye la franja filtrante, drene bien y permita el crecimiento de una vegetación densa, preferentemente de tipo herbáceo.

El suelo de las franjas filtrantes ha de ser estabilizado con vegetación antes de su funcionamiento, para evitar erosiones. Se debe preservar la vegetación existente (donde la haya), y mantener el crecimiento natural. En áreas problemáticas con pendientes mayores a 4:1 se deben utilizar geotextiles protectores de la erosión en las fases previas a la plantación y durante la misma. En general, la superficie de la franja debe ser densamente vegetada con una mezcla de especies de plantas resistentes a la erosión y tolerantes a la sequía y a concentraciones de sales altas. Las plantas pueden ser herbáceas o leñosas. La vegetación que se considera óptima se compone de plantas con patrones de crecimiento denso, con un sistema de raíces fibrosas que den estabilidad, una buena capacidad de rebrote, y adaptadas a los suelos y condiciones climáticas locales. La vegetación autóctona siempre es preferible.

4.1.4.3 Jardín microcuenca

Otro tipo de franjas filtrantes son los jardines microcuenca con cavidades conformadas en el terreno para que alcancen un nivel inferior que el de las superficies adyacentes para captar agua de lluvia. Estos jardines pueden construirse en espacios contenedos o extenderse longitudinalmente para formar canales o arroyos de retención e infiltración de agua pluvial. En estos jardines será importante contar con la participación de un ecólogo, botánico y/o paisajista con conocimientos sobre vegetación que ayuden a diseñar la conformación y el tipo de plantas para el jardín.

Figura 4.14
Ejemplo de diseño de vegetación en jardín microcuenca.



Fuente: Tomado de BDAN, 2017.

Algunas consideraciones para su construcción son las siguientes:

- Cuando se cuenta con poco espacio y no existe drenaje pluvial, puede ser conveniente considerar otras alternativas que aporten mayor capacidad de captación.
- Esta técnica también es empleada para captar, aprovechar e infiltrar aguas grises, pero deberá apegarse a las consideraciones antes mencionadas en franjas filtrantes.

- El fondo de la microcuenca no deberá de ser compactado, de esta manera no se limita infiltración hacia el subsuelo.
- El suelo resultante de la excavación se puede utilizar para conformar un bordo alrededor de la microcuenca que ayudará a conducir y retener el agua.
- Los bordos deben de compactarse y se pueden cubrir con roca o con vegetación (cubresuelos, por ejemplo) para evitar la erosión.
- Pueden construirse con suelos artificiales a partir de materiales reciclados de la infraestructura vial, tales como composta, *mulch*, residuos de excavación y residuos de demolición de estructuras civiles.

4.1.5 Especificaciones técnicas para drenes filtrantes

Son canales poco profundos recubiertos de geotextil y rellenos de material granular filtrante en el que suele haber uno o dos conductos de transporte (Figura 4.15). Están diseñados para captar y filtrar la escorrentía de superficies impermeables contiguas (p. ej. carreteras), transportándola hacia aguas abajo. Pueden incorporarse de manera efectiva en el paisaje y los espacios públicos abiertos, y con un diseño cuidadoso pueden tener requisitos mínimos.

La profundidad de los drenes debe ser generalmente de 1 a 2 m. La profundidad mínima del medio filtrante debajo de cualquier tubería de distribución de entrada y sistemas de recolección de desagüe debe ser de 0.5 m para garantizar niveles razonables de eliminación de contaminantes (Hatt *et al.*, 2007). Donde se permite la infiltración, el nivel freático debe estar al menos 1 m por debajo de la base del dren, para evitar una eventual contaminación.

Cuando se implementan drenes filtrantes junto a carreteras, es necesaria una mayor distancia del drenaje a la vía principal, y complementar con tiras de césped debido al problema causado por el desprendimiento de las piedras, acumulación de limo y arcillas y la turbulencia del agua en el pavimento (Figura 4.15). Si es necesario, los drenes podrían construirse con una membrana impermeable para evitar este problema.

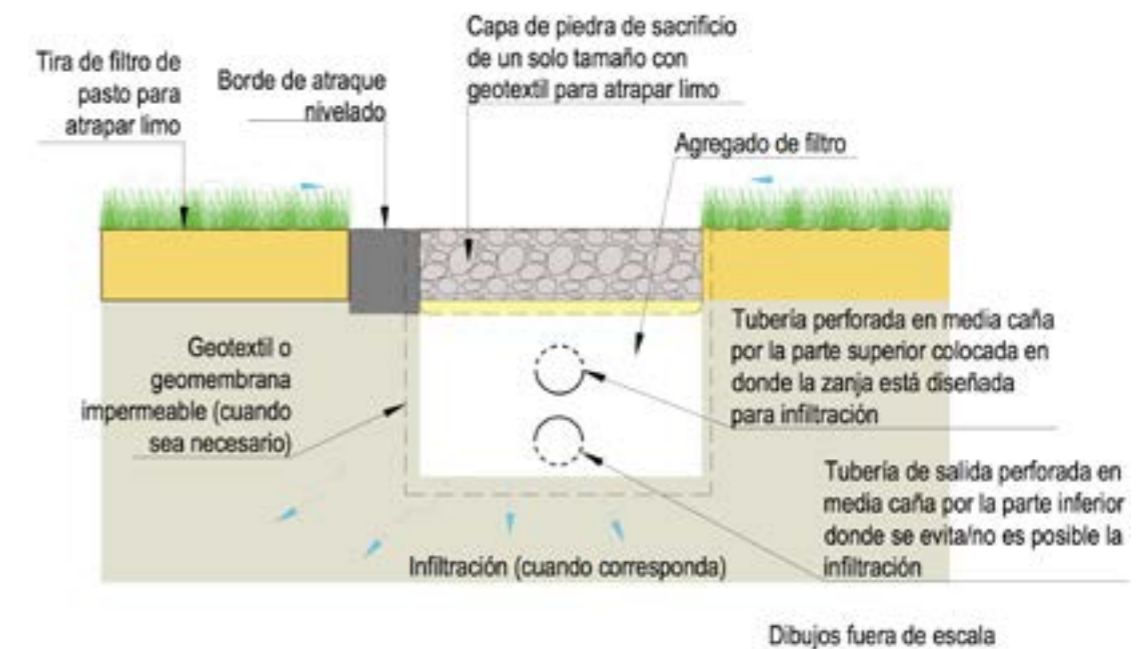
Los drenes filtrantes se ubican mejor junto a superficies impermeables como carreteras con sistemas de pretratamiento aguas arriba. A menos que se incluya en el diseño un pretratamiento eficaz de los sedimentos, éstos son aplicables principalmente a áreas impermeables donde no hay altos niveles de partículas en la escorrentía. Asimismo, el uso drenes filtrantes generalmente se restringe a sitios con pendientes suaves o nulas. La pendiente longitudinal no debe exceder el 2% (Woods-Ballard *et al.*, 2015) debido a que se requieren velocidades bajas para un transporte estable y evitar la erosión y que ocurran procesos de remoción de contaminantes.

Los drenes filtrantes no deben ubicarse en un suelo inestable, y esto debe verificarse mediante la evaluación de las condiciones del suelo y la distancia al nivel freático. Los drenes están diseñados para un flujo intermitente y se debe permitir que se escurran y reaireen entre eventos de lluvia, por lo tanto, no deben usarse en sitios con un flujo continuo o temporadas de lluvias extensas y de alto grado de precipitación. Los drenes pueden resultar un componente útil de gestión de aguas superficiales en sitios donde los sistemas con vegetación no son prácticos.

La identificación de los suelos subyacentes está basada en los mapas de suelo de referencia local en donde se identifique preferencialmente suelos de textura media a gruesa. De forma natural, estas propiedades las presentan suelos de poco desarrollo o de influencia fluvial. La textura es el indicador para la selección o el conocimiento de la conductividad hidráulica (Ver Anexo D).

Cuando las condiciones locales de los suelos del sitio no corresponden a los requerimientos, se propone adecuar el sitio para generar la salida de agua de infiltración.

Figura 4.15
Esquema de un dren filtrante.



Fuente: Modificada de Woods-Ballard *et al.*, 2015.

4.1.5.1 Consideraciones hidráulicas para el diseño de los drenes filtrantes

Hay tres elementos principales en el diseño de drenes filtrantes (Woods-Ballard *et al.*, 2015):

- I. La elección del material del dren para la filtración adecuada del agua y las características de la franja de césped.
- II. El almacenamiento, que depende del material y de la infraestructura de desagüe del dren.
- III. El diseño del sistema de tuberías para transportar agua.

La tasa de percolación del agua a través del material del filtro se puede estimar aproximadamente usando la Ley de Darcy. La tasa de percolación debe ser suficiente para cumplir con los criterios anteriores de diseño.

El almacenamiento de agua del dren depende de la relación de vacíos del material elegido y la tasa de regulación aguas abajo. La tubería ranurada en la base del drenaje del filtro debe diseñarse utilizando métodos de diseño de tubería convencionales para lograr los flujos requeridos para cumplir con los criterios de diseño específicos del sitio. Las perforaciones en la tubería deben ser suficientes para proporcionar un flujo adecuado de la misma manera que para los sistemas de biorretención.

4.1.5.2 Consideraciones para el diseño en el tratamiento y calidad de agua

A menos que se permita la infiltración, los drenes filtrantes no proporcionarán una reducción significativa en las cargas de contaminantes a las aguas superficiales a través del control de escorrentía volumétrica, ya que sólo pueden proporcionar una interceptación limitada. La capacidad de permitir la infiltración desde el dren filtrante dependerá de la extensión de la posible contaminación de la escorrentía y de las características del sitio.

Hatt *et al.* (2007) informaron que los filtros de grava son una opción de tratamiento eficaz para la escorrentía, donde el tratamiento de sedimentos y metales pesados es la principal preocupación. Las eficiencias de rendimiento informadas por Hatt *et al.* (2007) fueron superiores al 90% para TSS (sólidos disueltos) y, en general, del 60 al 80% para los metales pesados. Higgins *et al.* (2008) sugieren eficiencias de rendimiento similares. A menos que se pueda realizar un monitoreo regular y la remoción y lavado regulares del filtro de grava, no se recomienda usar drenes filtrantes como mecanismo de captura de sedimentos.

4.1.6 Especificaciones técnicas para estanques y humedales

Debido a su naturaleza, el diseño de los estanques y humedales dependerá principalmente de la ubicación y características del sitio. Su diseño debe considerar la inclusión de una serie de zonas (Figura 4.16)

ZONA 1. ESTANQUE PROFUNDO.

Esta zona es la que tiene mayor profundidad, lo que permite recibir los sedimentos, se considera como la zona de depósito de sedimentos, su principal función es disipar la energía de los sedimentos y favorecer el tratamiento de nitratos como nutrientes que contamina el agua. Debe ser diseñado para mantener una columna de agua a lo largo de todo el año, de tal forma que puedan vivir organismos como peces y otros organismos acuáticos. También se pueden establecer plantas flotantes que permitan la absorción de nutrientes.

Esta zona está integrada por (1) una estructura de entrada por donde fluye el agua de lluvia que puede ser tubería, caja de desvío o una tira de césped, de tal forma que se atenúe la velocidad del flujo y evite la erosión de la piscina; (2) de forma opcional se puede integrar un colector amortiguador, y sirve para disipar la energía y eliminar residuos de tejidos de vegetal y sedimentación. Donde existan riesgos de sedimentos y residuos (p. e. aguas abajo de autopistas y carreteras), se debe incluir una bahía de carga de sedimentos, por lo que el estanque se puede dividir en dos, para permitir que los sedimentos gruesos se asienten en la bahía de carga antes de que la escorrentía ingrese al estanque permanente. La bahía de carga permite monitorear fácilmente la

acumulación de sedimentos y concentra cualquier actividad de remoción de sedimentos requerida dentro de un área pequeña, minimizando así el daño potencial al resto del estanque. Este colector puede aumentar el tiempo de contacto del agua con los sedimentos; (3) la parte más profunda en donde habitan plantas acuáticas, mosquitos y peces y (4) la salida de la zona debe estar libre de vegetación para no tener obstrucción. El talud o pendiente de esta zona debe tener un gradiente entre 1:3 – 1:4.

ZONA 2. ZONA DE AGUA SOMERA O POCO PROFUNDA.

También es conocida como la zona de pantano, ya que el suelo está constantemente saturado o húmedo, y representa la conexión hidráulica entre la zona 1 y la zona de salida. Esta zona generalmente está cubierta por vegetación herbácea cuyas raíces toleran la humedad constante. Esta zona actúa como la principal área de tratamiento y ayuda a prevenir la resuspensión de los sedimentos más finos. Por lo tanto, la cima del nivel de agua para este volumen debe estar orientado en contra a la estructura de salida, a menos que se incluya una “profundidad de infiltración”, es decir, una profundidad entre el nivel contrario al de la salida y la elevación superior del revestimiento, sobre la cual se recomienda que se produzca la infiltración. En humedales más grandes, este volumen del estanque se puede distribuir en una serie de “microestanques”.

ZONA 3. TIERRAS BAJAS O POCO PROFUNDAS.

También es conocida como zona de marisma alta, ya que es una zona de inundación temporal que proporciona el almacenamiento necesario durante y después de un evento de lluvia. Esta zona funciona similar a una llanura aluvial y es donde se establece la vegetación que proporciona un poco de sombra. Es una zona de alta absorción de contaminantes y hábitat de vida silvestre. En esta zona se prefiere tener una vegetación arbustiva y herbácea o siembra de pasto/flores silvestres, por lo tanto, la profundidad del suelo o sustrato debe ser más profunda entre 40 y 45 cm.

ZONA 4. TIERRAS ALTAS.

Esta zona rara vez está húmeda, no requiere de criterios de diseño, sin embargo, se puede utilizar como una zona de amortiguamiento, en este sentido puede ser una zona de conectividad entre ecosistemas. Lo importante es que sea una zona que no tenga una pendiente muy elevada, para no favorecer la erosión del sistema y favorecer el mantenimiento de la estructura.

Desde un punto de vista de manejo de suelo, estos sistemas son aptos en zonas de alta precipitación en donde probablemente haya mayor desarrollo de suelo y formación de arcillas, lo cual garantiza la retención de agua. La principal restricción es la cercanía a zonas agrícolas que favorezca la descarga de altas concentraciones de nutrientes, de tal forma que sobrecargue el sistema y reduzca la eficiencia de remoción de contaminantes. Es un criterio que se debe incluir en el diseño y para el mantenimiento. Asimismo, la selección de la vegetación es un criterio importante ya que se debe garantizar que el sistema mantenga las plantas a lo largo del año.

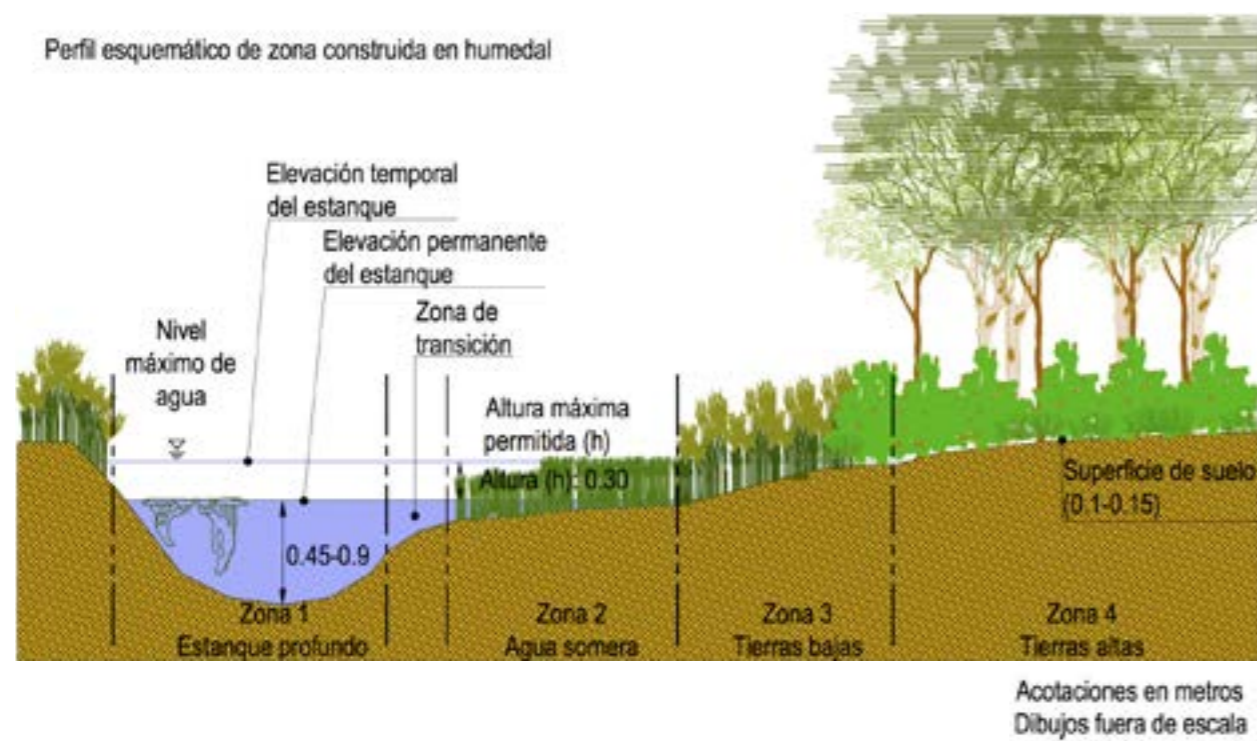
Las características de diseño también deben incluir una ruta más baja, acceso de mantenimiento a todas las áreas del estanque, un banco de seguridad alrededor del perímetro del estanque (para proporcionar una distancia adecuada antes del agua

abierta (esto desalienta el acceso directo y facilita la vigilancia del estanque y el rescate si es necesario) y también suele actuar como una ruta de mantenimiento. Los estanques más grandes deben, preferiblemente, dividirse en zonas, proporcionando la calidad del agua y la cantidad de almacenamiento en volumen en varias celdas independientes. Éstas pueden crear una mayor atenuación, vías de eliminación de contaminantes más largas (por lo tanto, una mejor eliminación de la contaminación), un régimen de mantenimiento más fácil y una ecología más variada.

Los materiales que requiere este diseño son:

Capa de *mulch*, fibras naturales como madera triturada, que permitan la retención de agua y filtración de partículas. Se propone una capa de material filtrante, esta capa puede ser acondicionada con 10-15% de arcillas de la localidad o 10 a 20% de proporción de biocarbón, se puede incorporar caliza triturada en caso de requerir amortiguar partículas ácidas o 10-15% de zeolita (incremento de costos). Finalmente, se coloca una capa de sustrato grueso, que puede ser suelo en el caso de ser arenoso, o mezclas de gravas de tamaños menores a 0.5 mm.

Figura 4.16
Humedal y su perfil de suelo.



La forma y la apariencia estética dependerán de las características específicas del sitio, los objetivos del paisaje/servicios y los criterios de diseño del desarrollo. El Manual de aguas pluviales de la WDOE (Labib, 2001) incluye recomendaciones para la caracterización del sitio y las actividades relevantes. Estas recomendaciones se resumen en la Tabla 4.9 (Massman, 2003). Las recomendaciones de la WDOE relacionadas con la profundidad de las perforaciones del suelo o los pozos de prueba deben considerarse como requisitos mínimos. La identificación de estratigrafía y estratificación a pequeña escala puede ser particularmente importante en términos del potencial de acumulación de agua subterránea.

Tabla 4.9
Requisitos de la WDOE para la caracterización del subsuelo en instalaciones de infiltración.

Requisitos de WDOE (Labib, 2001)	Recomendaciones
Exploraciones del subsuelo (fosas de prueba o pozos de prueba) hasta una profundidad por debajo de la base de la instalación de infiltración de al menos 5 veces la profundidad máxima de diseño del agua estancada propuesta.	La profundidad de los pozos de prueba (5 veces la profundidad de diseño) debe tomarse como un requisito mínimo, pues existen condiciones en las que las tasas de infiltración pueden verse afectadas por características profundas del sistema de flujo de aguas subterráneas, por ejemplo, en acuíferos someros muy cercanos a la superficie. En muchos casos, es prudente continuar las exploraciones del subsuelo hasta profundidades de 15 m o más.
Muestreo continuo (muestras representativas de cada tipo de suelo y/o unidad de infiltración) hasta una profundidad por debajo de la base del suelo de infiltración de 2.5 veces la profundidad máxima del nivel de agua permanente de diseño, pero no menos de 2 m.	Debe tomarse como un requisito mínimo. Puede que no sea conservador, especialmente para estanques que reciben escorrentía de múltiples tormentas. Las capas relativamente pequeñas a gran escala pueden afectar el rendimiento de la infiltración, incluso si estas características se encuentran relativamente profundas debajo de la instalación. En muchos casos, probablemente se justifique la obtención de muestras continuas y un muestreo más detallado a mayor profundidad.
Al menos una fosa de prueba o pozo de prueba por cada 500 m ² de superficie de infiltración.	Ésta es una cantidad razonable de investigación.
Preparación de registros detallados para cada pozo de prueba y un mapa que muestre la ubicación de los pozos de prueba. Los registros deben incluir, como mínimo, la profundidad del pozo, las descripciones del suelo, la profundidad del agua y la presencia de estratificación.	Ésta es una recomendación razonable y apropiada.
Como mínimo, se debe realizar un análisis del tamaño de grano del suelo por estrato de suelo en cada pozo de prueba dentro de 2.5 veces la profundidad máxima del agua de diseño, pero no menos de 2 pies.	Los análisis de tamaño de grano deben realizarse en muestras de todos los estratos encontrados en las perforaciones del suelo. Se recomiendan perforaciones más profundas.
La caracterización del suelo para cada unidad de suelo (suelos de la misma textura, color, densidad, compactación, consolidación y permeabilidad) encontrada debe incluir: distribución del tamaño de grano, clase de textura, porcentaje de contenido de arcilla (incluya el tipo de arcilla, si se conoce, color/moteado y variaciones y naturaleza de la estratificación).	Éstas son recomendaciones prudentes y razonables.

Requisitos de WDOE (Labib, 2001)	Recomendaciones
Instalación de pozos de monitoreo de agua subterránea (al menos tres por instalación de infiltración, a menos que se sepa que el nivel más alto de agua subterránea está al menos 16 m por debajo de la instalación de infiltración propuesta).	Ésta es una recomendación prudente y razonable. Tenga en cuenta que, si los pozos se instalan a 50 pies, se recomiendan muestras de suelo continuas o casi continuas para la profundidad total.
Monitoreo de los niveles estacionales de agua subterránea en el sitio durante al menos una temporada de lluvias.	Ésta es una recomendación prudente y razonable.
Estimación de la capacidad volumétrica de retención de agua del suelo receptor de infiltración.	Ésta es una recomendación prudente y razonable.
Dirección y gradiente del flujo de agua subterránea existente, extensión lateral del receptor de infiltración, conductividad hidráulica horizontal de la zona saturada.	Ésta es una recomendación prudente y razonable.
Impacto de la tasa y el volumen de infiltración en el sitio del proyecto, en la dirección del flujo y el nivel freático; y el punto o área de descarga del agua infiltrada. Se debe realizar un análisis de acumulación de agua subterránea en todos los sitios donde la profundidad del nivel freático estacional o el estrato de baja permeabilidad sea inferior a 5 m y la escorrentía a la instalación de infiltración sea de más de un volumen de 4000 m ³ .	Los análisis de la acumulación de agua subterránea son prudentes. Sin embargo, el requisito de un volumen 4000 m ³ para un análisis de acumulación es arbitrario. Esto debe basarse en la profundidad prevista de la descarga de aguas pluviales. Los estratos de baja permeabilidad por debajo de los 5 m también pueden afectar la acumulación y deben tenerse en cuenta.

Fuente: Tomado de Labib, 2001.

Respecto al nivel máximo del agua, normalmente no debe exceder los 2 m en el evento de diseño de precipitaciones más extremo. Sin embargo, muchas autoridades requerirán una profundidad máxima más baja, por razones de seguridad.

El fondo de cualquier cuenca vegetada debe ser bastante plano, con una pendiente suave (no más de 1 en 100) hacia el desagüe, para maximizar el contacto de la escorrentía con la vegetación y evitar que se desarrollen las condiciones del agua estancada. Las áreas por encima de las elevaciones normales de agua de la cuenca también deben estar inclinadas hacia la cuenca para permitir un drenaje efectivo.

La relación de largo/ancho recomendada para los estanques con vegetación es de entre 3:1 y 5:1. Las entradas y salidas deben estar alineadas preferentemente para maximizar el recorrido del flujo a través de la instalación.

Es posible que se requiera un revestimiento para mantener el nivel del agua y prevenir la infiltración de escorrentías donde la evaluación de riesgos de calidad del agua indica que esto no es aceptable y/o protege un acuífero subyacente.

Asimismo, estos sistemas son apropiados en suelos con infiltración muy baja (suelos con contenidos de arcilla > 30%). Si ésta no es la condición natural, se propone adi-

cionar un revestimiento de arcilla en la base de la estructura. El nivel freático es poco profundo y los flujos de sedimentos son muy altos. En la siguiente Figura se presentan las consideraciones de diseño para estos sistemas.

Figura 4.17
Diseño de un biorretenedor de contaminantes.



Fuente: Tomado de Dylewski et al., 2014.

En materia de suelo estos sistemas se componen de cuatro partes:

- I. Dispositivo de pretratamiento: Sirve para ralentizar la velocidad de la escorrentía, proporciona un fácil acceso al sistema y reduce la cantidad de sólidos totales, favoreciendo la sedimentación. Los materiales que se sugieren para la construcción de este dispositivo son gravas de 8".
- II. Un filtro de pasto, representado por una franja de pasto.
- III. Colector amortiguador de escorrentía, que acumula la mayor parte de los sedimentos y disipa la energía de entrada de la corriente al sistema.
- IV. El diseño del dren filtrante incluye una capa de *mulch* de madera triturada, que permite la retención de agua y filtración de partículas. Se recomienda usar en esta capa un mantillo de madera dura triturada triple porque tiene menos tendencia a flotar y obstruir las estructuras de desbordamiento. Se acepta usar otros tipos de mantillo, como la corteza de pino, son aceptables cuando la madera dura no está disponible. No use recortes de césped como mantillo, ya que esto aumentará la carga de nitrógeno.

No se recomienda usar mantillo fresco porque puede agotar el N disponible durante el proceso de maduración. Es importante utilizar la capa de *mulch* o mantillo porque ésta inhibe el crecimiento de malezas, previene la erosión, fomenta la actividad de los microorganismos, proporciona una superficie para que el exceso de

agua se evapore, y evita que el medio subyacente se seque por completo durante los periodos de sequía. La capa de mantillo reduce la compactación del medio durante las fuertes lluvias y previene la propagación de enfermedades fúngicas u otros patógenos transmitidos por el suelo que pueden extenderse por salpicaduras de agua del suelo a las plantas. El sedimento se deposita en la superficie del mantillo como agua de lluvia, ingresa a la estructura, por lo tanto, el mantillo sirve como pretratamiento para la celda para evitar la obstrucción.

El esquema de la Figura 4.17 se propone el uso de una capa de material filtrante, que es una mezcla de suelo compuesto por una proporción entre 8 y 10% limos y arcillas, las cuales favorecen los procesos de absorción de compuestos contaminantes inorgánicos.

Para favorecer la retención de compuestos contaminantes orgánicos se sugiere adicionar entre 3 y 5% de madera envejecida, también se propone usar biocarbón, en proporciones menores a 5%, de acuerdo con la disponibilidad. Este material se ha probado alta capacidad de retención de contaminantes, además de proporcionar a largo plazo propiedades de retención de agua (Paz-Ferreiro *et al.*, 2014). El resto de material ~80% corresponde a arena lavada, en algunos casos se cuenta con residuos de caliza triturada, la cual permite neutralizar o favorecer procesos de precipitación de contaminantes, además de neutralizar compuestos ácidos. La mezcla debe proporcionar una conductividad hidráulica media, de tal forma que el agua no esté estancada por más de 4 días.

El diseño también propone una capa de sustrato grueso, que puede ser material arenoso o mezclas de gravas de tamaños menor a 0.5 mm. Una opción para sistemas verdes es el uso de residuos de cascajo o residuos de construcción de otras obras civiles, y es posible utilizarlo como material de relleno filtrante, ya que por sus características permite controlar el pH del agua que filtra y regular la concentración de metales pesados en solución, además de permitir la infiltración del agua a través de la infraestructura.

Para la filtración de contaminantes estos componentes requieren ser cubiertos con vegetación. En el caso de manejo de contaminación por metales es posible utilizar especies de plantas bioacumuladoras, por ejemplo, *Anthoxanthum odoratum*, *Agrostis canina*, *A. capillaris*, *A. stolonifera*, *Deschampsia cespitosa*, *D. flexuosa*, *Festuca rubra*, *F. ovina*, *Holcus lanatus* y *Silene vulgaris* (Baker y Brooks, 1989).

El papel de la vegetación es muy importante, ya que las raíces de las plantas airean los suelos y exudan nutrientes y carbono, lo que favorece el hábitat y el crecimiento de los microorganismos. Las raíces también contribuyen a los procesos químicos y físicos que mejoran la estructura del suelo, y aumentan la capacidad de infiltración y permeabilidad del medio.

4.1.6.1 Consideraciones hidráulicas para el diseño de los estanques y humedales

El volumen de almacenamiento temporal del estanque/humedal debe dimensionarse para proporcionar atenuación de inundaciones y para que todos los eventos cumplan con los estándares de servicio del sitio, hasta los eventos de 10, 30 o 100/200 años de retorno (incluidas las asignaciones apropiadas a escenarios de Cambio Climático e influencia urbana), si es necesario, con las descargas restringidas a las tari-

fas equivalentes de campo verde (u otras acordadas). Se deben tener en cuenta los eventos más grandes, ya que éstos deben redirigirse de forma segura aguas abajo. Es posible que sea necesario aumentar los volúmenes de atenuación si se requiere almacenamiento adicional para brindar un control volumétrico adecuado de la escorrentía para el evento de 100 años. Para más detalles cuantitativos de las consideraciones hidráulicas puede consultarse a Massman (2003).

4.1.6.2 Consideraciones para el diseño en el tratamiento y calidad de agua

Los estanques y humedales no proporcionarán una reducción significativa en la carga de contaminantes a través del control de escorrentía volumétrica, ya que generalmente no brindan intercepción. Estos sistemas tratan la escorrentía entrante mediante el asentamiento y la absorción biológica. El principal mecanismo de eliminación de contaminantes es la sedimentación de limos y sedimentos en suspensión. La absorción de contaminantes, en particular nutrientes, también se produce hasta cierto punto a través de la actividad biológica del estanque. En este sentido, la vegetación acuática emergente y sumergida a lo largo de la costa sustenta una comunidad microbiana activa capaz de consumir los componentes disueltos en la afluencia.

Los flujos de entrada de los estanques de la mayoría de los eventos de escorrentía rempazan una parte del volumen anterior y se almacenan y tratan hasta que son desplazados por el flujo base perenne o el próximo evento de escorrentía.

El factor de diseño principal que determina la eficiencia del tratamiento de un depósito es el volumen del estanque permanente. Los resultados de la investigación de Lampe (2004) sugieren que los tamaños de los estanques permanentes mayores a 2 veces el volumen medio anual de tormentas no mejoran significativamente el rendimiento del tratamiento ni reducen la variabilidad de la concentración del emisario. Esto equivale a un volumen de tratamiento de 10 a 15 mm de profundidad de lluvia que cae sobre la cuenca contribuyente.

Cuando los estanques se implementan como elementos finales de tratamiento (aguas abajo de los componentes que brindan tanto la eliminación de sedimentos como el tratamiento adicional, por ejemplo, pavimentos permeables, cunetas o sistemas de biorretención), pueden ser aceptables en tamaños más pequeños, dependiendo de la efectividad de los componentes aguas arriba. No se debe considerar que los estanques más grandes brindan una capacidad de tratamiento mejorada, y es importante que los estanques no reciban la escorrentía contaminada directamente, ya que esto provocará fallas en la prestación de servicios y rendimiento de la biodiversidad, y además aumentará los riesgos y costos de mantenimiento.

En general, las instalaciones de estanques húmedos funcionan mejor cuando el agua superficial que entra en el estanque se mueve a través de éste como una sola ola o unidad, desplazando completamente el volumen del estanque húmedo, un fenómeno conocido como flujo de tapón.

Al evitar que se produzcan cortocircuitos, este patrón de flujo maximiza el tiempo de retención hidráulica, lo que mejora el asentamiento de partículas y sedimentos ligados a partículas, un proceso clave en la efectividad del tratamiento de estanques. El almacenamiento de eventos de calidad del agua se puede proporcionar en múltiples celdas. El rendimiento del tratamiento mejora cuando se proporcionan múlti-

ples vías de tratamiento utilizando múltiples células, trayectorias de flujo más largas, relaciones de superficie a volumen más altos y microtopografía compleja asociada a los procesos de erosión. Finalmente, se requiere un revestimiento impermeable para evitar fugas del estanque.

Si el diseño de los estanques implica que tengan más de 1.5 m de profundidad, se recomienda que se proporcione algún tipo de recirculación en el verano, como una fuente o un aireador, para evitar el estancamiento y las condiciones de bajo nivel de oxígeno disuelto (lo que deriva en eutrofización de estos cuerpos de agua). Puede ser deseable una pequeña cantidad de flujo base para mantener la circulación y reducir el potencial de condiciones de bajo oxígeno durante el final del verano.

Es importante considerar que, en el caso de colocar árboles en la periferia de los estanques, éstos deberán ser plantados a lo largo de los lados oeste y sur de los estanques (no en terraplenes), lo cual puede servir para reducir el riesgo de calentamiento térmico, particularmente en sitios cercanos a áreas urbanas densas donde los efectos de islas de calor pueden generar temperaturas altas durante los meses de verano. Además de dar sombra, los árboles y arbustos también desalientan el uso de los estanques por aves acuáticas y los problemas de enriquecimiento de fósforo que esto causa.

4.1.7 Especificaciones técnicas para cuencas de retención

La apariencia y diseño de las cuencas de retención dependerá de las características particulares de cada lugar, los objetivos del paisaje, las amenidades planeadas y los servicios para las que estén construidas.

La relación de largo/ancho recomendada para las cuencas de retención con vegetación que forman parte de un conjunto de Infraestructura Verde Vial es de entre 3:1 y 5:1. Las entradas y salidas deben diseñarse para obtener trayectorias de flujo lo más lineales que sean posibles. La base de las cuencas también se puede construir con una capa de suelo que permita una superficie firme y seca.

La profundidad máxima del agua en la cuenca normalmente no debe exceder los 2 m en el evento de diseño más extremo. Sin embargo, para cuencas cercanas a áreas transitadas o muy cercanas a las carreteras se requerirá una profundidad máxima mucho menor, por razones de seguridad. El fondo de cualquier cuenca con vegetación debe ser bastante plano con una pendiente suave (no más de 1 en 100) para proteger la salida de la erosión, y para maximizar el contacto de la escorrentía con la vegetación y así evitar que se desarrollen condiciones de agua estancada. Las áreas por encima de la cuenca también deben estar inclinadas hacia ésta para permitir un drenaje efectivo. Para una máxima eficacia de eliminación de contaminantes en cuencas con vegetación, los flujos deben distribuirse a lo largo de todo el ancho de la cuenca.

Cuando en la cuenca se deba evitar la infiltración (nivel freático muy cercano a la superficie) y se quiera evitar la creación de un humedal, es posible que se requiera un revestimiento en la base de la cuenca y así proteger el acuífero subyacente.

Cuando se utilicen otros componentes de la Infraestructura Verde Vial (cunetas, drenes o franjas filtrantes), su diseño debe seguir las pautas establecidas de estas infraestructuras (velocidad máxima de flujo, pendientes, etc.). También se podrían usar franjas filtrantes para transportar flujos bajos, pero éstos requerirán un tratamiento previo

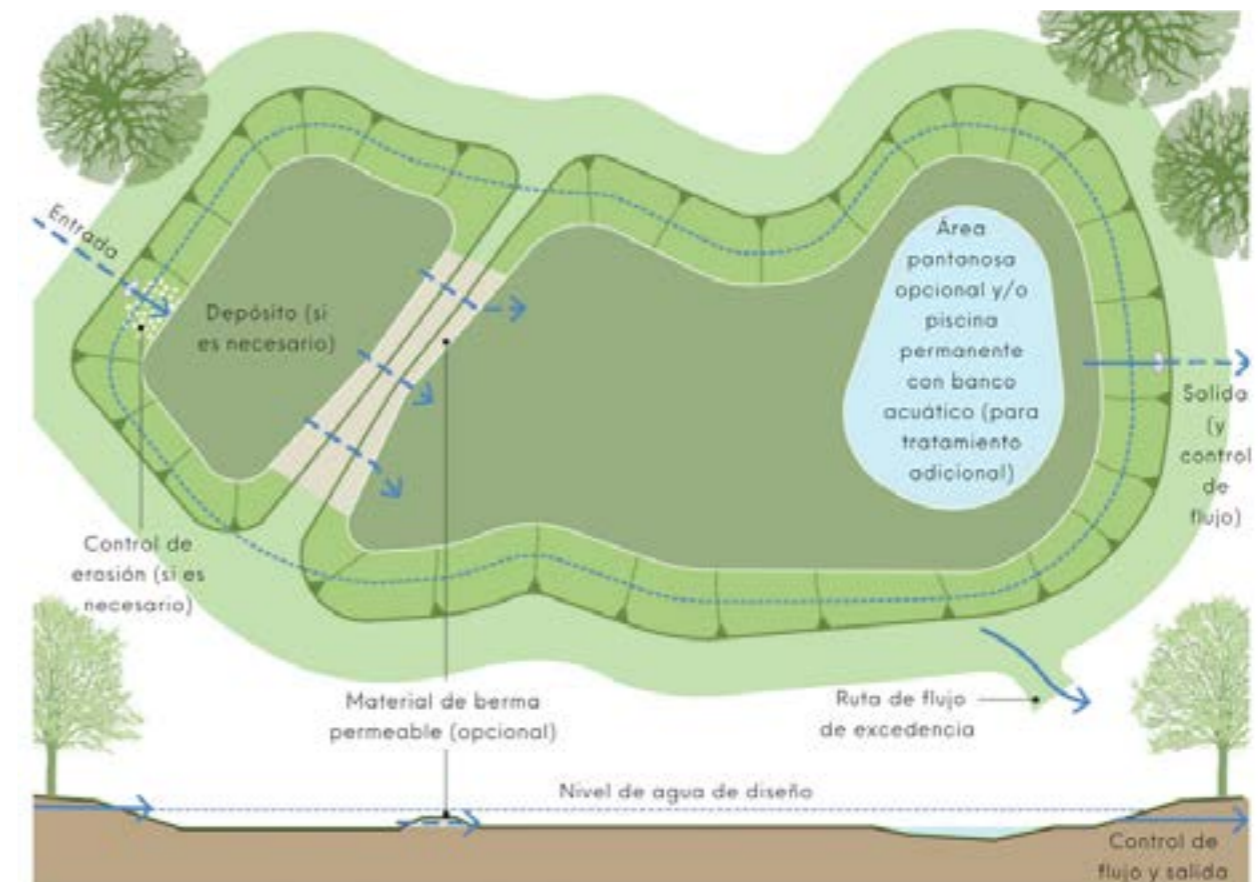
muy eficaz aguas arriba para disminuir el riesgo de contaminación. El uso de franjas filtrantes también conlleva un alto riesgo de mantenimiento debido a la erosión asociada con el movimiento del material del filtro durante eventos de flujo moderado a alto, y cualquier diseño debe garantizar que dichos riesgos se gestionen adecuadamente.

Se deben considerar las rutas de desfogue en caso de inundación cuando se exceda el evento de diseño de la estructura, así como la mitigación a las posibles fallas del terraplén de la cuenca.

Las pendientes laterales de cualquier cuenca de retención no deben exceder la relación 1 en 3 a menos que el sitio especial y/o arreglos de seguridad permitan pendientes más pronunciadas (por ejemplo, pendientes más pronunciadas pueden ser aceptables para cuencas muy poco profundas o lejos del tránsito vehicular y peatonal). Las pendientes no deben ser más pronunciadas que 1 de cada 3 en cuencas vegetadas y donde se deba cortar el césped, con el objetivo de reducir los riesgos asociados con las actividades de mantenimiento. Las pendientes más planas tienden a mejorar la estética a expensas de la toma de tierra adicional.

Siempre debe haber un acceso apropiado a la cuenca de retención para las actividades de mantenimiento, como el corte de pasto, la remoción de sedimentos, y el mantenimiento de las entradas, salidas y estructuras de control que pueden dañarse por la erosión.

Figura 4.18
Áreas de una cuenca de retención.



Fuente: Modificada de Woods-Ballard et al., 2015.

4.1.7.1 Consideraciones hidráulicas para el diseño de cuencas de retención

Deben verificarse los registros históricos del nivel del agua subterránea del sitio donde se considera instalar este tipo de cuencas para garantizar que, durante los periodos en que suba el nivel freático, se mantenga la capacidad de almacenamiento de la cuenca de retención y que la conectividad hidráulica entre la escorrentía del agua superficial y el agua subterránea sea aceptable desde la perspectiva de la calidad del agua. Si se utiliza un revestimiento, existe el riesgo de que el revestimiento “flote” o aflore durante los periodos donde el nivel freático esté cerca de la superficie y resultar en una base lodosa que puede considerarse poco atractiva si no se convierte en una característica de humedal permanente.

Las cuencas de retención se deben diseñar para amortiguar inundaciones para eventos de precipitación con periodos de retorno de 1:10, 1:30 o 1 evento cada 100 años, si es necesario. Se deben tener en cuenta los eventos más grandes, se deberán redireccionar de forma segura los caudales en sentido descendente (aguas abajo). Es posible que sea necesario aumentar los volúmenes de la cuenca si se requiere almacenamiento adicional para brindar un control volumétrico de la escorrentía para el evento de 1:100 años.

Las cuencas de retención con vegetación pueden generar alguna interceptación porque tiende a no haber escorrentía de ellas para la mayoría de los eventos de lluvia pequeña. El agua penetra en la capa superior del suelo de la cuenca y se elimina por evapotranspiración e incluso cantidades muy pequeñas de infiltración (cuando esto está permitido). El grado de reducción volumétrica de la escorrentía a las aguas superficiales dependerá de la tasa de infiltración del suelo circundante, el área de captación, el área y profundidad del sistema, el tipo de vegetación y el clima.

En los casos donde no hay infiltración, pero los suelos superficiales naturales (o suelos importados/rediseñados) tienen capacidad de almacenamiento de agua, las cuencas de retención normalmente no contribuyen al control volumétrico de la escorrentía, pero se pueden utilizar como almacenamiento a largo plazo.

La capacidad de exceso de flujo del desbordamiento debe confirmarse utilizando métodos y análisis de evaluación hidráulica normales (vertedero, orificio y flujo de tubería). También se deben confirmar los flujos excedentes más allá de la capacidad del desbordamiento. Cualquier estructura de flujo excedente debe ubicarse lo más cerca posible de la entrada para minimizar la longitud de la trayectoria del flujo, para flujos por encima de la capacidad, reduciendo así el riesgo de socavación.

Las cuencas de retención se utilizan a menudo como sistemas fuera de línea para gestionar los caudales excedentes del sistema principal de gestión de aguas superficiales. En este caso, normalmente tendrán un uso principal alternativo, por ejemplo, como instalaciones de esparcimiento.

4.1.7.2 Consideraciones hidráulicas para el diseño de tratamiento y calidad de agua

Las cuencas de retención con vegetación pueden ayudar a retener la escorrentía de eventos pequeños en el sitio, lo que ayuda a reducir la carga de contaminantes a través del control volumétrico de escorrentía residual, principalmente a través de la sedimentación gravitacional de contaminantes sólidos, aunque se producirá alguna filtra-

ción a través de la vegetación en la base de la cuenca y los suelos subyacentes junto con la biodegradación y la descomposición fotolítica de los hidrocarburos durante los procesos de secado entre los eventos de escorrentía. La clave para entregar niveles razonables de tratamiento usando cuencas de retención con vegetación es la captura y manejo efectivo de sedimentos y la distribución de los flujos de entrada a lo largo de un ancho suficiente de la cuenca de retención, maximizando así el área potencial de filtración con vegetación.

Se pueden incorporar pequeños estanques en la salida para reducir los riesgos de resuspensión de sedimentos de eventos más grandes y también pueden mejorar el desempeño de la calidad del agua al concentrar sedimentos más finos. Se requiere un buen desempeño en la remoción de contaminantes para todos los eventos de escorrentía, incluidos los eventos que ocurren, en promedio, aproximadamente una vez al año (denominado aquí el evento del periodo de retorno de 1:1 año). La duración de este evento debe ser la duración crítica relevante para la cuenca de retención. Para este evento de diseño de la calidad del agua (para cuencas vegetales) se recomienda:

- La profundidad del flujo debe mantenerse por debajo de la altura de la vegetación (es decir, generalmente < 100 mm).
- La velocidad máxima del flujo en la cuenca para tal evento debe ser de 0.3 m/s para asegurar una filtración adecuada de la escorrentía.
- El tiempo de viaje de la escorrentía desde la entrada hasta la salida de la cuenca (tiempo de residencia = longitud/velocidad) debe ser de al menos 9 minutos.

Para calcular la velocidad promedio de flujo en la cuenca, se debe usar la ecuación de Manning. El valor “n” de Manning o el “coeficiente de rugosidad” indica hasta qué punto la superficie de la cuenca resistirá el flujo y es fundamental en su tamaño.

4.1.8 Especificaciones técnicas para pozos de infiltración

Hay muchos factores de diferente índole que deben tenerse en cuenta al diseñar un sistema de pozos de infiltración. A continuación, se hace una síntesis de los principales aspectos para su diseño (Femke R. *et al.*, 2013). Inicialmente, es necesario identificar los objetivos de la recarga que se quieren lograr, por ejemplo:

- Mejorar la calidad del agua subterránea.
- Evitar que el agua salada se introduzca en los acuíferos costeros.
- Gestión de aguas no deseadas (es decir, reutilización de efluentes).
- Impedir el hundimiento de la tierra, mantener o restaurar los niveles de las aguas subterráneas.
- Reducir las pérdidas por evaporación del agua almacenada.

Si hay varios objetivos que se quiere cumplir, se debe hacer una distinción entre el objetivo principal y uno o más objetivos secundarios.

Además de los objetivos de recarga, la recarga debe tomar en cuenta la demanda y la disponibilidad de la fuente de agua. Estos aspectos juntos definen el requisito de almacenamiento, y se mencionan a continuación.

I. DEMANDA DE AGUA.

Uno de los primeros pasos en un estudio de factibilidad es evaluar la demanda de agua actual y proyectada. Idealmente, se deben analizar los datos de la demanda diaria de agua durante un periodo de 10 a 15 años, incluidos los promedios, la variabilidad mensual, las tendencias observadas y las expectativas. En el caso de infraestructura vial se debe tomar en cuenta la demanda de agua concesionada y de las comunidades. Este estudio también deberá hacerse aguas arriba y aguas abajo del sitio en estudio.

II. FUENTE DE AGUA PARA ALMACENAMIENTO.

Para cada fuente potencial de agua, la cantidad, la calidad y la variabilidad asociada deben evaluarse cuidadosamente a fin de evaluar la idoneidad para la aplicación de pozos de infiltración. De manera similar a la demanda de agua, se deben analizar los datos de suministro de agua diarios durante un periodo de 10 a 15 años, incluida la variabilidad y las tendencias promedio y mensual, en particular, para las fuentes temporalmente variables. Una vez que se han abordado los problemas de cantidad y calidad de la recarga, es posible evaluar aquellas épocas del año en las que el agua de recarga está disponible en una cantidad útil y con la calidad adecuada.

III. REQUISITO DE ALMACENAMIENTO.

En función de la variabilidad en la demanda, el suministro y la calidad del agua, se puede estimar la cantidad de agua que debe y puede almacenarse con este sistema. Posteriormente, se puede estimar la velocidad a la que se debe recargar y recuperar el agua durante un ciclo operativo. La capacidad de los pozos de infiltración se dimensiona con respecto a las tasas de inyección y en su caso, recuperación y el volumen recuperable total durante un ciclo operativo; utilizando el volumen recuperable total y la tasa de recarga se puede determinar la capacidad del o los pozos individuales y el número requerido de pozos.

4.1.8.1 Consideraciones hidráulicas para el diseño de pozos de infiltración

Todos los pozos que infiltren agua a los acuíferos requieren una caracterización completa de las condiciones hidrogeológicas en las cercanías del sitio del proyecto.

Algunas de las principales características del acuífero que deben evaluarse son:

- Litología y elementos estructurales (fracturas, lechos, juntas).
- Espesor, profundidad y extensión del acuífero.
- Espesor, profundidad y extensión de los acuitardos circundantes (si los hubiera).
- Calidad del agua en el acuífero objetivo.
- Composición geoquímica (reactividad) de la matriz del acuífero.
- Salinidad y calidad del agua subterránea ambiental.
- Flujo de agua subterránea regional.

Después de la selección de un sistema de pozos infiltrantes, se puede configurar un diseño preliminar. Un diseño puede consistir en pozos de infiltración poco profundos o profundos, pozos verticales u horizontales, pozos que pueden inyectar y recuperar agua, o una combinación de ambos. Además, es posible que sea necesario incorporar en el diseño instalaciones de pre y postratamiento y pozos de monitoreo.

Para el caso de pozos de tratamiento y recuperación, también se debe definir claramente varios aspectos durante la fase de diseño preliminar, tales como (Femke R. et al., 2013):

- La estructura de los ciclos de recarga-recuperación.
- El periodo durante el cual se almacena el agua antes de que se recupere.
- Cómo cumplir con los criterios de calidad para el agua recuperada o, en otras palabras, cuándo detener la recuperación según el monitoreo de calidad en línea.

4.1.8.2 Consideraciones para el diseño en el tratamiento y calidad de agua

Para vigilar la calidad del agua que se incorpora al acuífero mediante los pozos infiltrantes deberá referirse a la norma NOM-015-CONAGUA-2007, infiltración artificial de agua a los acuíferos, características y especificaciones de las obras y del agua, cuyas especificaciones principales son:

- Se deberán observar las especificaciones establecidas en el numeral 6.2 de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-CONAGUA-1996, requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos.
- La infiltración no deberá afectar la calidad del agua nativa. Para el muestreo del agua nativa se utilizará la Norma ISO/CD 5667-11-2006 Calidad del Agua, muestreo, parte 11: guía para el muestreo de aguas subterráneas, la que la sustituya o la Norma Mexicana correspondiente (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2006).
- Las obras de disposición de aguas al subsuelo mediante pozos de infiltración deben contar con un sistema de tratamiento que garantice que el agua en el punto de infiltración tendrá los límites establecidos en la Tabla 4.9.
- Se deberá incorporar en el pozo un instrumento de muestreo y prueba que cumpla con la Norma ISO 15839:2003 *Water quality-On-line sensors/analysing equipment for water-Specifications and performance tests*, la que la sustituya o la Norma Mexicana correspondiente (ISO, 2003).
- Los resultados de las pruebas realizadas con el instrumento señalado en el numeral anterior podrán ser requeridas por la autoridad en las visitas de inspección.
- La distancia mínima entre el fondo del pozo y la superficie freática será de 5 m.

Tabla 4.10
Límites y métodos de prueba para los principales contaminantes de agua en pozos de infiltración.

Contaminante	Unidad de medida	Límite	Método de prueba*	Método de muestreo
Grasas y Aceites	mg/l	15	NMX-AA-005-SCFI-2000	NMX-AA-003-1980
Materia flotante	Unidad	0	NMX-AA-006-SCFI-2000	
Sólidos sedimentables	mg/l	2	NMX-AA-004-SCFI-2000	
Sólidos suspendidos totales	mg/l	150	NMX-AA-034-SCFI-2001	
Nitrógeno total	mg/l	40	NMX-AA-026-SCFI-2001	
Fósforo total	mg/l	20	NMX-AA-029-SCFI-2001	
Coliformes fecales	NMP/100 ml	No detectable	NMX-AA-042-1987	

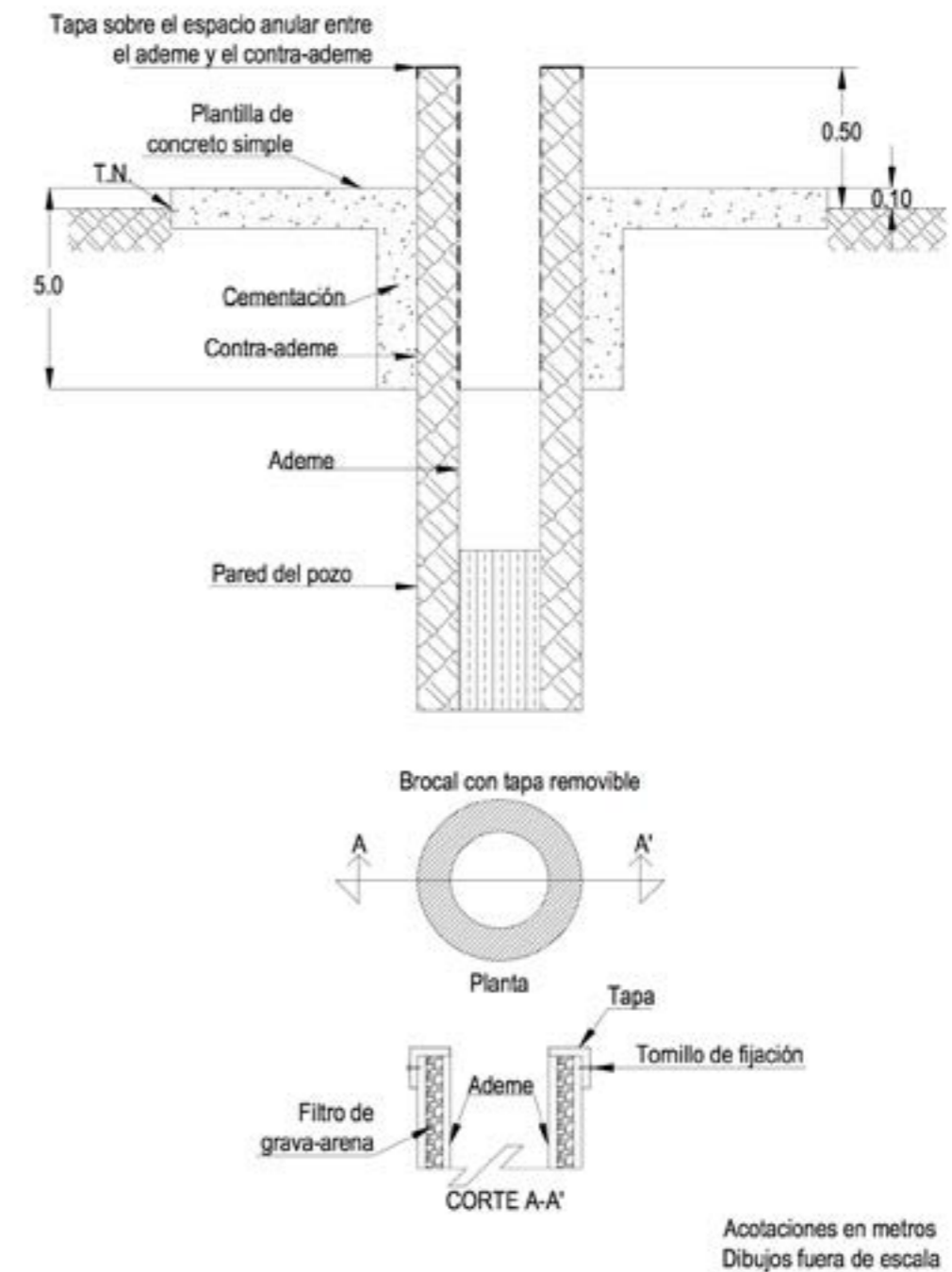
Ver en NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua.

Las recomendaciones mínimas para la elaboración de pozos se encuentran contenidas en la NOM-003-CONAGUA-1996, requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos.

Entre los puntos más importantes se encuentran los siguientes:

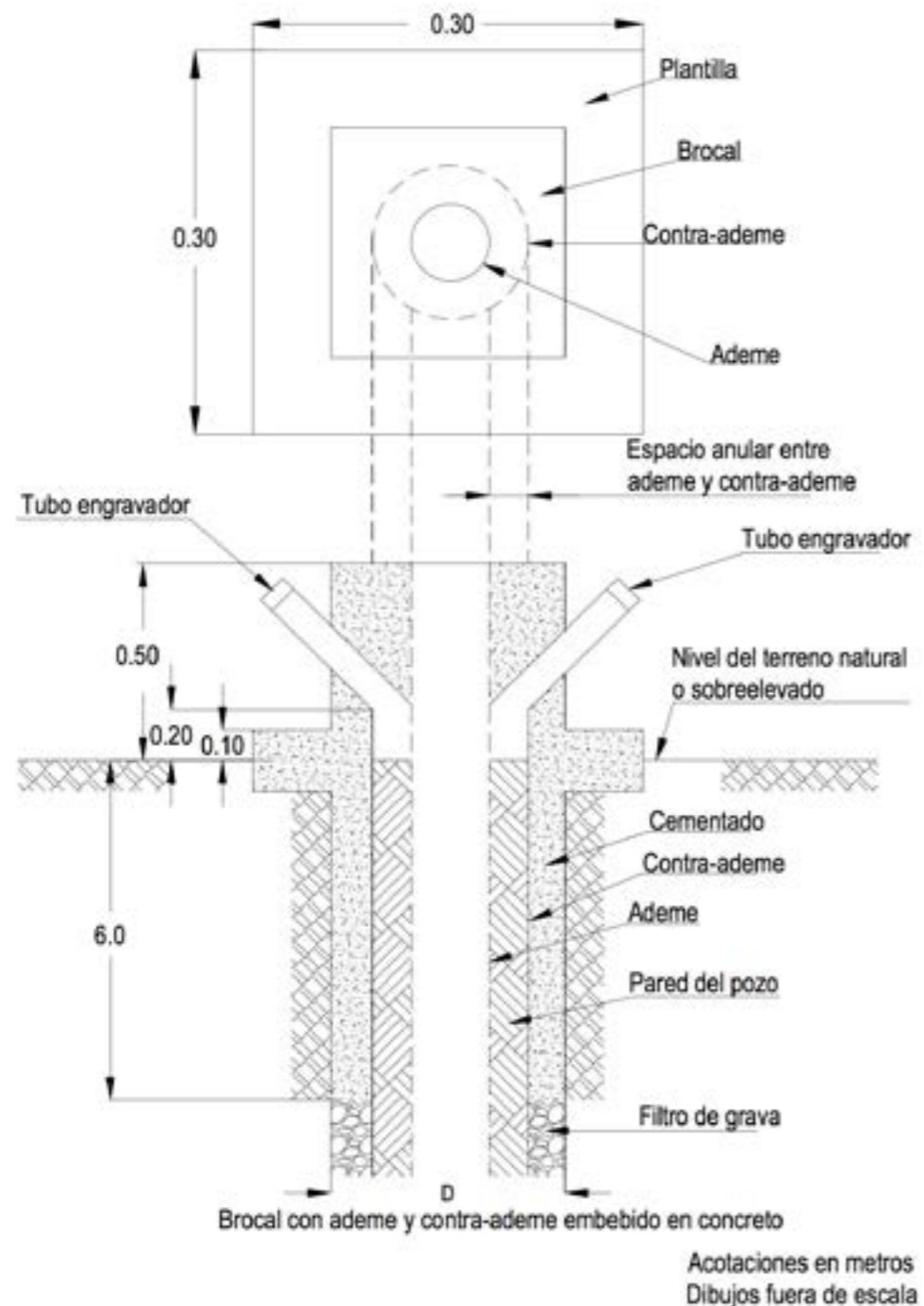
- El radio mínimo del pozo podrá ser modificado por la comisión o por la autoridad local competente, a través de la disposición legal o reglamentaria aplicable, con base en un estudio específico del sitio que considere la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación y la extensión de su área de influencia, para diferentes tiempos. Cuando no sea posible cumplir el radio mínimo, el concesionario o asignatario deberá presentar a la comisión el diseño que propone para evitar la contaminación del acuífero, basado en estudios hidrogeológicos.
- En ninguna circunstancia se debe permitir el uso de aguas residuales para su construcción.
- Todos los aprovechamientos hidráulicos subterráneos deben contar con protección sanitaria. De acuerdo con la estructura del pozo, el espacio anular entre las paredes de la formación y el ademe, así como la terminal superior del pozo, son las áreas que presentan mayor riesgo de contaminación.
- Para los procesos constructivos, desarrollo, aforo y desinfección, se pueden consultar los libros de perforación de pozos y rehabilitación de pozos del "Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento", editado por la Comisión Nacional del Agua (2019).

Figura 4.19
Diseño típico de pozo filtrante.



Fuente: Tomado de NOM-003-CONAGUA-1996.

Figura 4.20
Diseño típico de pozo filtrante.



Fuente: Tomado de NOM-003-CONAGUA-1996.

4.2 Especificaciones técnicas para el diseño y construcción de la Infraestructura Verde Vial en materia de servicios ambientales

4.2.1 Especificaciones técnicas para la reducción de gases de efecto invernadero (energías renovables)

La construcción de la Infraestructura Verde Vial desde el punto de vista energético pretende autoabastecer de electricidad a los proyectos carreteros y de vías férreas, dotándolos de independencia de la red eléctrica y evitando al máximo el uso de líneas de transmisión y distribución en zonas remotas como una medida de reducción del impacto derivado de la modificación del uso del suelo y como medida de eficiencia en el uso de la energía eléctrica, lo que se traduce en una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Como principio, para asegurar el adecuado funcionamiento y duración de los sistemas de generación de energía renovable, se debe iniciar con la selección de componentes de alta calidad apegados a la normatividad internacional. Las piezas y los equipos fabricados con materiales de calidad inferior, o una mano de obra no calificada para su instalación, pueden provocar problemas de operación y un bajo rendimiento en el futuro. Una duración de por lo menos 20 años del sistema de generación es uno de los criterios que los responsables del proyecto deben considerar, para asegurar el buen funcionamiento, la seguridad y la durabilidad del proyecto y la inversión.

En este apartado se proponen los lineamientos de diseño, construcción y gestión de Infraestructura Verde Vial basados en energías renovables, principalmente, energía solar y eólica, que permitirán dotar de sustentabilidad a los proyectos de infraestructura vial.

4.2.1.1 Especificaciones técnicas para la energía solar

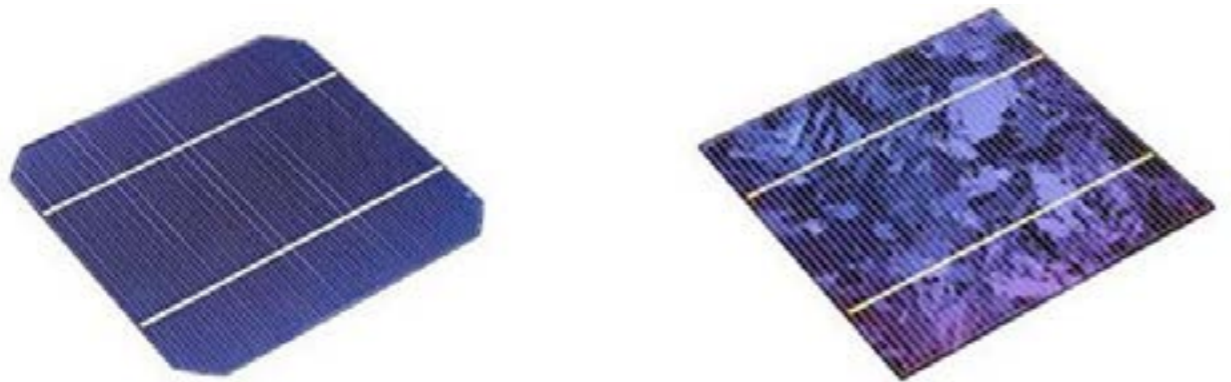
A pesar de que existen diferentes usos tanto para paneles monocristalinos como policristalinos, la selección del tipo determinado de módulo a usar debe ser evaluado por un especialista que ayude a determinar las necesidades y particularidades de cada módulo, considerando el propósito y sitio donde será instalado. De manera general se puede indicar que los módulos monocristalinos se recomiendan en climas fríos, ya que tienden a absorber mejor la radiación y soportan menos el sobrecalentamiento; a diferencia de los policristalinos, los cuales son mejores en climas cálidos, pues absorben el calor a una mayor velocidad y resultan menos afectados por el sobrecalentamiento.

Algunas de las características de los tipos de módulos mencionados son las siguientes:

- **Panel solar monocristalino:** están hechos de un silicio más puro, lo que les da un color más uniforme, además de resultar más eficientes al momento de generar energía. Debido a su pureza y proceso de elaboración, suelen tener costos un poco más elevados que los policristalinos.
- **Panel solar policristalino:** son paneles constituidos por un conjunto de cristales de silicio. Al estar conformados por células cuadradas, permiten un mejor acomodo, ahorrando así espacio en el módulo. Se caracterizan por tener una eficiencia de conversión óptima, poco menos que los monocristalinos, por esta razón su costo suele ser menor.

Figura 4.21

En la imagen del lado izquierdo se observa una celda solar monocristalina y del lado derecho se tiene una celda solar policristalina.



Fuente: Tomado de <https://www.tindosolar.com.au/learn-more/poly-vs-mono-crystalline>

4.2.1.1.1 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS PARA SU CONSTRUCCIÓN

Previo a la construcción se debe de conocer la demanda de energía que se pretende suministrar, a modo de realizar el cálculo de los paneles que será necesario utilizar, y considerando las condiciones del lugar (ver Fichas 6 y 7) de las cuales depende en buena parte la cantidad de energía netamente producida por los equipos.

El procedimiento por seguir para la construcción de un componente de Infraestructura Verde Vial de generación de energía solar contempla los siguientes pasos:

I. PRIMER PASO: ELECCIÓN DEL SITIO.

El primer paso es la selección del sitio donde se instalará el sistema de generación de energía solar, acompañado de la evaluación de las condiciones climáticas necesarias para el adecuado funcionamiento de éste y para la obtención de un mayor rendimiento-eficiencia posible a menores costos. La selección del sitio incluye el estudio de sombras para evitar el sombreado de los paneles. Se puede considerar la poda de árboles.

II. SEGUNDO PASO: INSTALAR LOS SOPORTES DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

Antes de colocar los paneles solares, es necesario instalar los soportes de la estructura que los sostendrá, ya sea sobre el piso o sobre la estructura de una edificación. Si es sobre el piso, se debe realizar una cimentación para colocar los soportes. Dependiendo de las características e inclinación de la superficie a instalar, variará el tipo de estructura a utilizar. Por ejemplo, la estructura soporte no será la misma en una superficie cuyos módulos se coloquen de forma coplanar a ella, que en una superficie plana en la cual haya que inclinar los módulos de una determinada forma para obtener una mayor eficiencia del sistema.

III. TERCER PASO: FIJACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE Y DE LAS PLACAS SOLARES.

Una vez instalados los soportes se coloca la estructura, la cual debemos fijar a los soportes y colocar sobre ella los paneles fotovoltaicos. Dependiendo de las características e inclinación de ésta, este proceso se lleva a cabo de diferentes formas. Es común que la cubierta de las edificaciones sea inclinada (en México la gran mayoría de las cubiertas están inclinadas entre 20° y 35°, esto favorece el rendimiento de una instalación, ya que los rayos solares tienen un mejor aprovechamiento cuando se reciben perpendicularmente al plano). El anclaje de la estructura de soporte variará en función de la superficie sobre la que irá anclada. Una vez anclada la estructura sobre los soportes, los módulos se colocan y se fijan a la misma, posteriormente, se interconectan entre sí para poder ser conectados al inversor.

IV. CUARTO PASO: CONEXIÓN AL INVERSOR ELÉCTRICO.

La interconexión de los paneles se realiza en serie entre los módulos de una misma fila y en paralelo para conectar las filas entre sí en función de la configuración seleccionada. Esto se realiza mediante los llamados conectores MC4 para conectar los módulos al inversor. Es importante realizar una buena conexión, ya que en caso contrario, repercutirá de forma negativa al rendimiento global de la instalación ocasionando posibles problemas como los denominados puntos calientes, que producen pérdidas de energía. La energía generada por los módulos fotovoltaicos se conduce a un punto para llegar al inversor que estará situado en un punto cercano al del centro de carga eléctrico de la aplicación a alimentar (por ejemplo, de los señalamientos o iluminación de carreteras o vías férreas). Esto puede apreciarse en la Figura 4.22.

Es importante que el inversor se encuentre resguardado de los rayos del sol, es decir, no debe ubicarse en la cara sur de la estructura ya que se vería afectado su rendimiento si se calienta, por lo que se aconseja su ubicación en interiores o, en caso de no poderse y situarlo en el exterior, dotarlo de algún elemento de protección. La función del inversor es la de convertir la electricidad que recibe en forma de corriente continua a corriente alterna, que es la que utilizamos en nuestros aparatos comúnmente.

V. QUINTO PASO: CONEXIÓN DE LAS BATERÍAS.

Si se requiere almacenar la energía generada por tratarse de sitios aislados de la red eléctrica, se deberá contar con un inversor capaz de gestionar la carga y descarga de las baterías, pues son el elemento más costoso y delicado del sistema. La capacidad de almacenamiento de las baterías se hará en función de la demanda y el campo fotovoltaico instalado. La conexión de las baterías se puede hacer en serie, en paralelo o en serie y en paralelo, siempre con baterías iguales. En el caso de las conexiones en paralelo se duplica la capacidad de las baterías, pero mantiene la misma tensión. En el caso de la conexión en serie, los resultados obtenidos van a ser opuestos: se mantiene la capacidad de las baterías, pero la tensión es el doble. Y, por último, en una conexión en serie y en paralelo, tanto la capacidad como la tensión subirán al doble.

Figura 4.22
Diagrama de conexiones de un sistema fotovoltaico con respaldo de baterías.

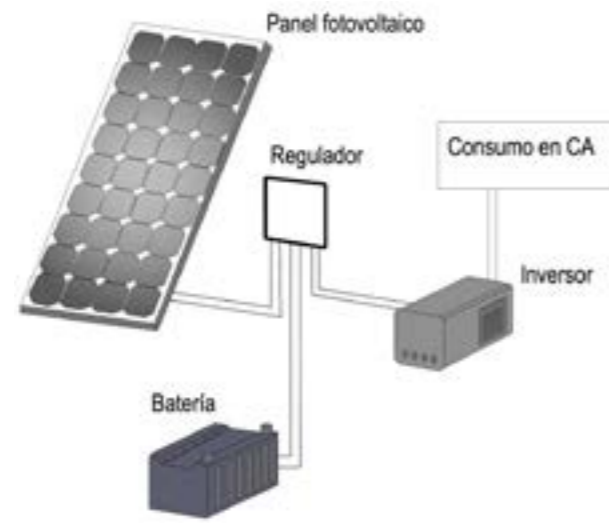
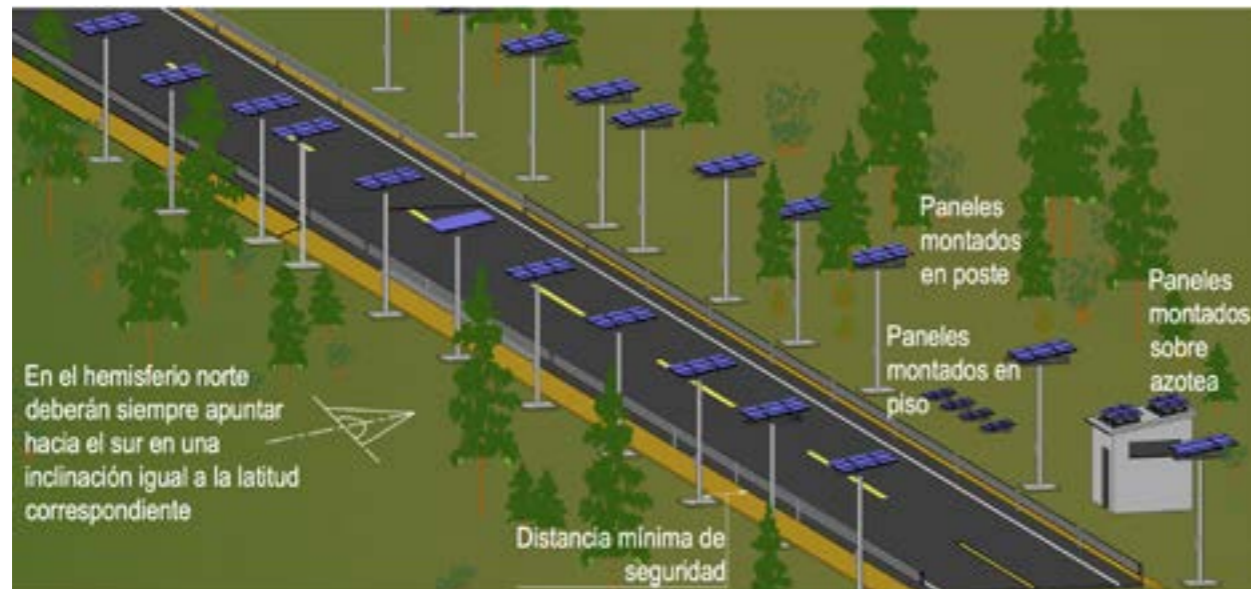


Figura 4.23
Diagrama de diseño de la colocación de paneles solares en la infraestructura vial.



4.2.1.2 Especificaciones técnicas para la energía eólica

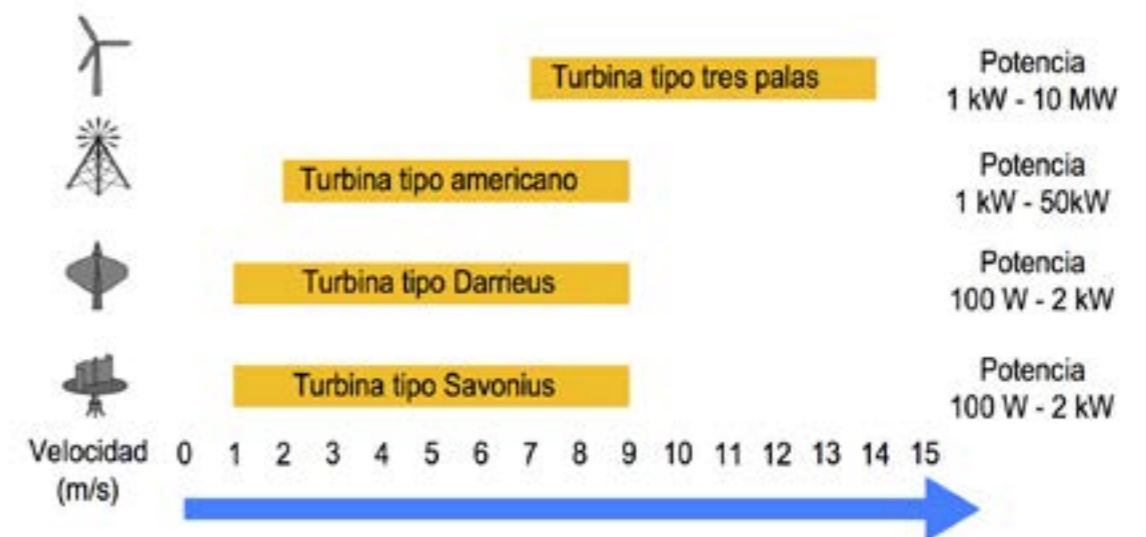
El viento entrega una energía gratuita, pero muy variable y requiere de un estudio detallado, ya que el potencial de energía producible por la instalación puede cambiar con base en obstáculos, velocidad del viento, alturas, orografía etc. Un estudio individualizado es por lo tanto aconsejado y requiere de la toma de medidas para determinar el potencial eólico y llevar a cabo la modelización de los vientos con base en la localización geográfica.

Una vez realizado el estudio, se procede a analizar con detalle el tipo de equipo a instalar considerando tanto las características del viento, del terreno y la seguridad vial. Hay que tener en cuenta que el rendimiento de las turbinas es diferente según la naturaleza del viento, y en algunos casos las eólicas pierden una gran parte de su eficacia en caso de turbulencias.

Las turbinas eólicas entregan la máxima potencia para vientos de 15 m/s, ya que una regulación electrónica limita la potencia entregada y la mantiene constante en un rango de viento comprendido entre 15 y 25 m/s.

Existen diferentes tecnologías de turbinas eólicas, de eje vertical y de eje horizontal. En la Figura 4.24 se muestra el uso recomendado de los equipos dependiendo de las velocidades de viento disponible y de la potencia que se puede obtener de ellos.

Figura 4.24
Velocidad de operación de diversas tecnologías eólicas.



Se puede clasificar a las energías eólicas de pequeña potencia de la siguiente manera:

Tabla 4.11
Clasificación de energías eólicas de pequeña potencia.

Potencia eólica	Características
50 W a 250 W	Microsistemas utilizados en pequeñas aplicaciones tales como recarga de baterías, zonas de bombeo aisladas, marina, etcétera.
250 W a 1.5 kW	Minisistema utilizado en aplicaciones de baja potencia como recarga de baterías de zonas aisladas, zonas rurales, doméstico, etcétera.
1.5 kW a 15 kW	De uso doméstico, se utiliza para generar energía eléctrica en instalaciones domésticas o reducir consumos de edificios de tipo centros deportivos, hoteles, etcétera.
15 kW a 500 kW	Tamaño pequeño y comercial, utilizado para generar energía eléctrica en instalaciones comerciales, fábricas, granjas y reducir consumos de edificios de tipo centros deportivos, hoteles, etcétera.

Algunas consideraciones para la instalación de sistemas eólicos como componentes de una Infraestructura Verde Vial es que éstos se localicen a lo largo de un corredor de la infraestructura vial. En el caso de las carreteras, se deberá evaluar la velocidad del viento y con base en ello determinar el tipo de turbina a instalar.

Otros factores clave para la selección de sitios donde se pueden instalar tecnologías eólicas incluyen:

- I. Proximidad a la infraestructura de iluminación vial existente.
- II. Presencia de barras de contención para proteger la tecnología eólica y evitar las incursiones del tráfico.
- III. Terreno suficiente y razonablemente nivelado detrás de la barra de contención para garantizar una instalación segura del equipo.
- IV. Factores específicos del sitio que podrían afectar la frecuencia o la velocidad del tráfico de camiones en las cercanías de los generadores y/o que podrían impedir o mejorar el flujo de viento turbulento, como:
 - El número de carriles a lo largo de carreteras.
 - Obstrucciones generales de viento (como árboles u otros obstáculos naturales o artificiales).
 - Proximidad a puntos de entrada y salida de carreteras, como rampas de entrada y salida, paradas de descanso, estaciones de pesaje de camiones, etc., que provocan que el tráfico se aleje del carril derecho; puentes, pasos superiores e inferiores.

Es importante mencionar que, si bien existe un potencial de producción de electricidad renovable a partir del viento generado a lo largo de los corredores de alto tráfico en las carreteras, es posible que éste no sea suficiente para ayudar a soportar las cargas eléctricas de la misma, como la iluminación, la señalización y las señales de emer-

gencia. Es por ello que el potencial del sitio para generar viento de manera natural siempre será el mayor indicador para determinar su uso, de lo contrario, los costos de implementación podrían ser más altos que empleando otro tipo de energía (Samberg et al., 2020).

4.2.1.21 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS PARA SU CONSTRUCCIÓN

El sistema de generación distribuida se permite para centrales eólicas con capacidad de generación menor a 500 kW. Los usuarios con esta capacidad no necesitan permiso para generar energía eléctrica; por eso se les llama generadores exentos y esto presenta grandes ventajas. Una de las razones para instalar este tipo de sistemas de generación eléctrica es con fines orientados a contribuir con el medioambiente o por ahorro en costos de generación eléctrica, más que por la búsqueda de generación de energía constante, como se hace con fines industriales (debido a las limitantes antes expuestas con este tipo de energía dependiente del viento). El procedimiento por seguir para la construcción de un sistema de generación de energía eólica con una potencia inferior a 500 kW consta de los siguientes pasos:

- I. Elección del lugar y evaluación de las condiciones climáticas (estudio de la velocidad del viento).
- II. Análisis de las autorizaciones necesarias.
- III. Estudio de viabilidad de la instalación y verificación de los costos.
- IV. Elección del proyectista y constructor y fase de implementación.
- V. Gestión de la instalación (manutención y gestión).

La inversión requerida para la construcción de una instalación de generación de energía eólica disminuye cuanto más elevada es la potencia de ésta. Además, el rendimiento de producción es proporcional al tamaño de la eólica. Las instalaciones eólicas de pequeña potencia presentan características que las dotan de una serie de ventajas adicionales respecto a las grandes eólicas, como el potencial de mayor eficiencia global por las pérdidas evitadas en las redes de transporte y distribución y que permiten la integración de generación renovable sin necesidad de crear nuevas infraestructuras eléctricas, para el transporte de la energía. Además, pueden fomentar la implicación ciudadana en la mejora de la eficiencia energética, el autoabastecimiento energético y la lucha contra el Cambio Climático.

Finalmente es importante mencionar que el diseño y la colocación de estos componentes deberán estar siempre acompañados de una evaluación que considere en primera instancia la seguridad vial.

Figura 4.25
Diagrama de diseño de la colocación de las turbinas eólicas en la infraestructura vial.



4.2.2 Especificaciones técnicas para la reducción de ruido

4.2.2.1 Especificaciones técnicas para las barreras acústicas

Las pantallas acústicas pueden ser de distintos diseños, por lo general existen empresas dónde se pueden mandar a hacer los diseños, a continuación, se mencionan algunos.

4.2.2.1.1 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS PARA SU CONSTRUCCIÓN

I. PANTALLAS ACÚSTICAS DE TIERRA.

Son montículos de tierra que pueden ser utilizados en carreteras de zonas rurales y semirurales. Ubicándolos apropiadamente, tienen ciertas ventajas sobre otros tipos de pantallas contra el ruido como:

- Tienen un aspecto “natural” y puede que no parezcan pantallas acústicas en lo absoluto.
- Pueden crear una sensación de amplitud, en contraste con las pantallas verticales.
- Normalmente no requieren barreras de seguridad adicionales.
- Dependiendo del exceso de material en la construcción pueden costar menos.
- Pueden ser menos costosas de mantener.
- Por lo general, tienen una vida útil ilimitada.

Figura 4.26
Pantalla acústica de tierra.



Fuente: Imagen a nivel de terreno, tomada de Google Earth para ejemplificar. Consulta 2021.

Pueden ser construidas a base de montículos de tierra de tecnosuelos formando taludes en los costados de la infraestructura vial.

II. PANTALLAS ACÚSTICAS DE CONCRETO.

Las pantallas acústicas normalmente se construyen sobre una base sólida de concreto. De esta forma aíslan completamente los márgenes de la infraestructura vial de los hábitats circundantes, aunque para los animales pueden ser un obstáculo para su movilidad, por ello su uso es mayormente recomendable en zonas urbanas o rurales. Una de las posibles soluciones para reducir este efecto barrera es la construcción de pequeñas aberturas en la base de las pantallas, aunque se desconocen con precisión los efectos de esta medida a nivel de dinámica de las poblaciones afectadas.

Según el tipo de módulo prefabricado que se seleccione, este tipo de pantallas pueden ser reflectantes o absorbentes.

Las reflectantes permiten soluciones arquitectónicas con una adecuada estética. Si la obra a realizar es de gran magnitud, es frecuente la realización de diseños especiales que confieren un carácter arquitectónico diferenciador a la pantalla.

Las absorbentes se clasifican en dos tipos, que se pueden categorizar como barreras de concreto con fibras de madera y barreras de concreto granulado. Usualmente los paneles son de 4 a 5 metros de altura y con un espesor de 140-190 mm, dependiendo de si son de absorción en uno o ambos lados.

En paneles de una sola cara de absorción, aproximadamente dos tercios de la anchura del panel es de absorción mientras que el tercio posterior es concreto sólido. La superficie absorbente es por lo general perfilada, con el fin de aumentar el área de absorción. Estos perfiles pueden ser dispuestos tanto verticalmente como horizontalmente.

Figura 4.27
Pantalla de concreto con fibras de madera.



Fuente: Imagen a nivel de terreno, tomada de Google Earth para ejemplificar. Consulta 2021.

Respecto a sus ventajas, proporcionan buen aislamiento, son de fácil mantenimiento y tienen gran durabilidad.

Las desventajas son la obstaculización de la visión, poca absorción, y mucha rigidez a impacto de vehículos.

III. PANTALLAS ACÚSTICAS CON MÓDULOS METÁLICOS.

Las pantallas acústicas metálicas suelen ser altamente absorbentes y están constituidas por paneles modulares metálicos con un material absorbente acústico en su interior. Los paneles tienen la doble función de aislamiento y absorción acústica, y están constituidos por una carcasa realizada con chapa plegada de acero o de aluminio y en su interior lleva el material absorbente que tradicionalmente ha sido lana mineral, utilizable en condiciones de saturación de humedad con un velo protector de agua y erosión eólica. Este tipo de barreras usualmente son diseñadas usando un metal perforado en la cara del frente, usando las propiedades del resonador de Helmholtz.

Un resonador de Helmholtz nos permite seleccionar ciertas frecuencias donde se produce la absorción máxima. Ésta es la frecuencia de resonancia del sistema perforado y por lo tanto dependerá de los diámetros de perforado, del porcentaje de superficie perforada, la distribución de éstos, etc. La elaboración del perforado de todos los paneles y, en concreto, de pantallas acústicas, se basa en ecuaciones simples que describen el comportamiento del resonador de Helmholtz.

Las pantallas perforadas se clasifican como pantallas absorbentes o muy absorbentes.

Figura 4.28
Pantalla acústica de metal perforado.



Fuente: Imagen a nivel de terreno, tomada de Google Earth para ejemplificar. Consulta 2021.

Las ventajas son la poca reflexión, su fácil mantenimiento y reposición y el buen comportamiento a impacto de vehículos.

Entre las desventajas destaca la obstaculización de la visión, su vida media moderada y baja resistencia al vandalismo.

IV. PANTALLAS ACÚSTICAS DE MADERA.

Estas pantallas pueden ser reflectantes o absorbentes, según lleven o no material absorbente. En el caso de ser absorbentes, generalmente están constituidas por una carcasa de madera que alberga unas planchas de lana mineral. En ciertos diseños, el material absorbente va adosado directamente sobre la carcasa de madera y se protege con tratamientos endurecedores de su superficie que a la vez la conforman para darle un cierto relieve. Estas pantallas presentan elevados resultados de absorción acústica.

Figura 4.29
Pantalla acústica de madera.



Fuente: Tomado de <https://insametal.es/pantalla-acustica-madera/>

Las ventajas son su posibilidad de alta absorción y gran integración en el ambiente.

Entre las desventajas se encuentra el alto costo de mantenimiento, su alta sensibilidad al vandalismo y riesgo de incendio.

V. PANTALLAS ACÚSTICAS TRANSPARENTES.

Son pantallas reflectantes, desde el punto de vista acústico, y generalmente se emplean para su construcción planchas de policarbonato, polimetacrilato o vidrio. Cada uno de estos materiales presenta diferentes características de resistencia mecánica y fragilidad, envejecimiento en intemperie y de riesgo para la seguridad vial.

Las principales consideraciones que hay que tener en cuenta son:

- Las marcas verticales en las pantallas transparentes son indispensables de considerar en la construcción.
- Las franjas deben tener 2 cm de ancho con una distancia máxima entre franjas de 10 cm (o 1 cm de ancho con una distancia entre ellas de 5 cm).
- Las franjas deberán ser de colores claros para poderse visualizar durante las horas de baja luz.
- Las marcas no deben causar ningún tipo de reflejo que pueda afectar a los conductores. Si se trata de adhesivos es fundamental que no sean de materiales reflectantes y se recomienda colocarlos en la parte exterior de la pantalla.
- La colocación de adhesivos que simulan siluetas de rapaces es recomendable, pero sólo se consigue su efectividad para evitar las colisiones con aves si se colocan con mucha densidad.
- Siempre se deben evitar las pantallas transparentes, pero si se requiere ofrecer un aspecto más integrado en el entorno pueden utilizarse recursos como camuflar las pantallas opacas con plantas trepadoras o con plantaciones de arbustos. No obstante, en pantallas transparentes se deben evitar las plantaciones de árboles o arbustos cerca de éstas porque aumenta el riesgo de colisiones.

Figura 4.30
Pantalla acústica transparente.



Fuente: Tomado de http://www.polyvida.com/portfolio-items/acoustic_barriers11/

Las ventajas son su gran permeabilidad visual, buena apariencia estética y la posibilidad de curvarse.

Entre las desventajas destaca que refleja el sonido, tienen vida media moderada, hay riesgo de accidentes para la fauna y riesgo por el impacto de vehículos si no se consideran las medidas complementarias.

En general, el espesor de las barreras acústicas comerciales va de 13 a 25 cm, con dimensiones de 0.5 a 1.0 de alto x 4.0 m de ancho y se montan sobre rieles en un basamento de concreto. Las de concreto se venden en placas de 4 m de ancho por 2.40 de alto.

Es importante mencionar que las pantallas acústicas también pueden ser construidas de materiales ecológicos (Quirós-Rodríguez, 2013), lo cual debe de priorizarse en el caso de instalarse en una Infraestructura Verde Vial.

Finalmente, el diseño y la colocación de estos componentes deberán estar siempre acompañados de una evaluación que considere en primera instancia la seguridad vial.

4.2.3 Especificaciones técnicas para la conectividad ecológica

4.2.3.1 Especificaciones técnicas para pasos para fauna

Generalmente en la literatura internacional se utilizan tres tipos de pasos para fauna: i) los que van sobre las vialidades (también llamados *overpasses*; ii) Los que van por debajo de las vialidades (*underpasses*), y iii) los pasos aéreos. No existe como tal una clasificación específica para los diferentes tipos de pasos para fauna, por lo que en este Manual se exponen ocho tipos de pasos considerando las características y tamaños de la fauna existente en nuestro país.

A continuación, se enlistan los ocho tipos de pasos a considerar en el presente Manual:

- I. Paso inferior para fauna (PIFA).
- II. Paso superior para fauna (PSFA).
- III. Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y paso para fauna).
- IV. Paso para fauna embebido en la infraestructura lineal.
- V. Paso aéreo para fauna arborícola.
- VI. Obra para el paso y protección de fauna voladora.
- VII. Paso temporal para invertebrados migratorios.
- VIII. Paso para fauna acuática.

Hay un gran número de diseños de pasos de fauna que van acorde a las especies que se desea proteger, y el beneficio ambiental es alto, por las vidas humanas y vida de especies de fauna silvestre que se pueden salvar mediante su uso.

4.2.3.1.1 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS PARA SU CONSTRUCCIÓN

En la siguiente Figura se presentan los distintos tipos de fauna que pueden ser considerados en diferentes ecosistemas del país, partiendo de la predominancia de ciertos tipos de fauna habitando estos ecosistemas.

Figura 4.31 Matriz de tipos de estructuras que pueden ser utilizadas por cada grupo de fauna dependiendo de su forma de vida y tipo de vegetación en la que se realice el proyecto de infraestructura lineal.

Grupo Taxonómico / Formas de Vida de la Fauna									
Tipo de Vegetación	Mamíferos grandes con amplio recorrido	Mamíferos medianos y pequeños	Reptiles grandes	Reptiles medianos y pequeños	Anfibio	Peces e invertebrados acuáticos	Organismos Arborícolas		
Desértica y semi desértica									
Bosque templado									
Bosque de niebla									
Bosque tropical perennifolio									
Bosque tropical caducifolio									
Matorral									
Pastizal natural o zacatonal montano									
Humedal/Manglar									
Halófila/gipsófila y de duna									
SIMBOLOGÍA									
	Puente	Ecoducto	Losía	Bóveda	Cajón grande	Cajón mediano	Cajón chico	Tubo embebido	Paso aéreo
									Cuando lleven agua la mayor parte del año

Fuente: Tomado de Dirección General de Servicios Técnicos, 2020.

Para más información sobre el diseño y construcción de pasos de fauna, la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes ha elaborado el *Manual de diseño de pasos para fauna silvestre en carreteras* (2020). En él podrán encontrar especificaciones y lineamientos a seguir desde la etapa de planeación hasta el monitoreo que deberán acompañar imperativamente a este Manual. En este sentido la metodología para evaluar la conectividad ecosistémica en la infraestructura vial desde la etapa de planeación se tiene desarrollada en este mismo Manual.

4.2.4 Especificaciones técnicas para otras alternativas de componentes de la Infraestructura Verde Vial

4.2.4.1 Especificaciones técnicas para pavimentos permeables

El concreto permeable usa los mismos materiales que se utilizan en las mezclas de concreto convencional, con la excepción del agregado fino o arena que se elimina por completo, y el agregado grueso o grava que se selecciona para tener una distribución de tamaño estrecha, es decir, una granulometría en una banda de tamaños limitada para así permitir que exista el mínimo de compactación de partículas y se promueva el crear espacios o huecos vacíos. Los proveedores locales de concreto hidráulico frecuentemente podrán determinar el diseño y calcular las proporciones de la mezcla de concreto permeable de la mejor manera para los materiales locales disponibles, basados en mezclas de prueba y en su experiencia.

La Tabla 4.12 muestra los rangos típicos para calcular las proporciones para un concreto permeable.

Tabla 4.12
Rangos típicos* para calcular las proporciones de materiales del concreto permeable.**

	Proporciones, kg/ m ³	Proporciones, lb/ yd ³
Total de material cementante	270 a 415	450 a 700
Agregado	1190 a 1480	2000 a 2500
Relación agua/cemento*** (en masa)	0.27 a 0.34	
Relación agregado: cemento*** (en masa)	4 a 4.5 : 1	
Relación agregado fino: grueso**** (en masa)	0 a 1 : 1	

* Estas cantidades son ofrecidas solamente como información general. El diseño exitoso de la mezcla dependerá de las propiedades particulares de los materiales a usar, y se deben de evaluar en mezclas de prueba en laboratorio para poder determinar qué se espera de su comportamiento. Los proveedores de concreto hidráulico pueden contar con diseños de mezclas ya optimizados para su desempeño con los materiales disponibles en la localidad, en estos casos, dichos diseños son preferibles.

** Aditivos químicos, especialmente retardantes de fraguado y estabilizadores de hidratación, son usados comúnmente en dosificación recomendada por los fabricantes. El uso de materiales cementantes suplementarios como ceniza volante o escoria de alto horno también es común.

*** Relaciones más altas han sido usadas, no obstante, esto puede resultar en reducciones significativas en la resistencia y en la durabilidad del concreto permeable endurecido.

**** La adición de agregado fino (arena) resultará en la disminución del contenido de huecos y en el aumento de la resistencia.

Para el diseño de pavimentos de concreto permeable se debe usar un evento de precipitación adecuado. Dos consideraciones importantes son la cantidad de lluvia para una cierta duración del evento y la distribución de esa cantidad de lluvia sobre el periodo de tiempo especificado. Es importante seleccionar el periodo de tiempo en el que se repetirá el evento (tiempo en el que volverá a ocurrir), ya que este tiempo determina la cantidad de precipitación que debe considerarse en el diseño.

El diseñador selecciona los materiales apropiados y sus propiedades, el espesor apropiado del pavimento y otras características que se necesitan para cumplir simultáneamente con los requerimientos hidrológicos y con las cargas de tráfico anticipadas. Se requiere del análisis separado de ambos, los requerimientos hidráulicos y estructurales, siendo el valor más amplio el que determinará el espesor final de diseño. Los proveedores locales de concreto hidráulico frecuentemente podrán determinar el diseño y proporción de la mezcla de concreto permeable de la mejor manera para los materiales locales disponibles, basados en mezclas de prueba y en su experiencia.

4.2.4.1.1 CONSIDERACIONES HIDRÁULICAS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS PERMEABLES

El diseño de un pavimento de concreto permeable debe considerar varios factores. Las tres consideraciones más importantes son la cantidad de precipitación pluvial esperada, las características del pavimento, y las propiedades del suelo de soporte. Sin embargo, el factor hidrológico de control en el diseño de un sistema de concreto permeable es la intensidad de escorrentía que puede ser tolerada. La cantidad de escorrentía es menor a la precipitación total porque una porción de la lluvia es capturada en las pequeñas depresiones en el suelo (almacenamiento en la depresión), alguna cantidad se infiltra al suelo, y alguna cantidad es interceptada por la superficie. La escorrentía también está en función de las propiedades del suelo, particularmente la tasa de infiltración: suelos secos y arenosos filtran agua rápidamente, mientras que suelos arcillosos densamente compactados casi no absorben nada de agua durante el tiempo crítico de mitigación de la escorrentía. La escorrentía también se ve afectada por la naturaleza de la tormenta de lluvia; diferentes eventos de tormentas resultarán en diferentes cantidades de escorrentía, de tal manera que la selección apropiada de un evento de diseño es importante. En los siguientes párrafos se discutirán brevemente estos temas.

En muchos casos, el concreto permeable simplemente reemplaza una superficie impermeable. En otros casos el sistema de pavimento de concreto permeable debe diseñarse para infiltrar mucha más cantidad de lluvia que la que precipitará directamente sobre el pavimento mismo. Estas dos aplicaciones se pueden denominar mitigación "pasiva" y "activa" de la escorrentía, respectivamente.

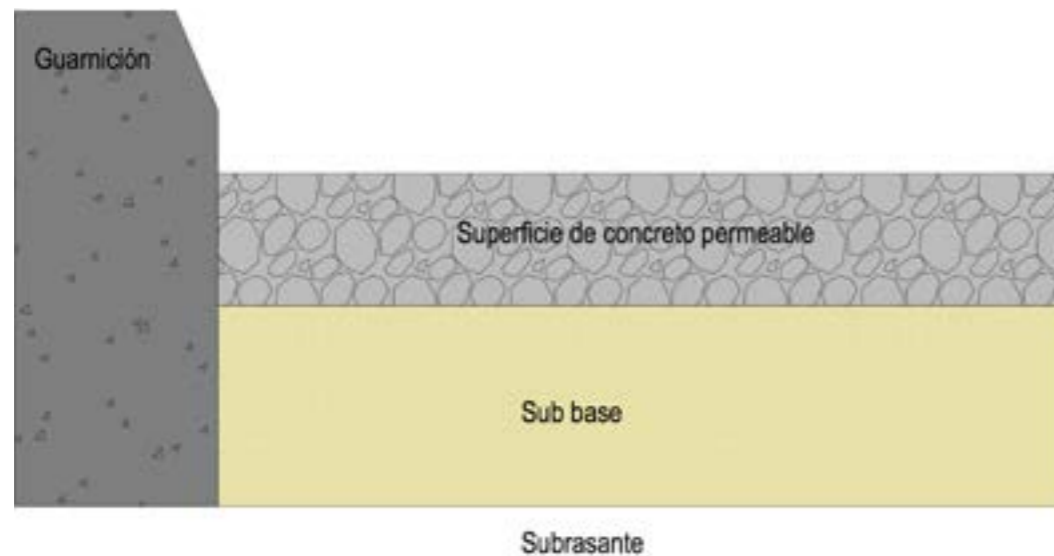
Un sistema de mitigación pasivo puede capturar mucho, si no es que todo el volumen de agua de la primera precipitación, pero no se pretende que tome el escurrimiento excesivo de superficies impermeables adyacentes. Un sistema de mitigación activo se diseña para mantener la escorrentía de un lugar a niveles específicos. El concreto permeable que se usa en un sistema de mitigación activa debe de tomar o tratar escorrentía de otras superficies en el sitio, incluyendo edificios, áreas pavimentadas con concreto convencional impermeable y zonas buffer, que pueden o no pueden estar plantadas con vegetación.

Cuando se usa un sistema de mitigación activo, canaleta, drenaje del sitio, o cobertura del suelo se debe asegurar que el flujo de agua hacia el sistema de pavimento permeable no acarrea sedimento o partículas que resulten en el taponamiento del sistema. En un estudio de factibilidad se encontró que al usar concreto permeable para lotes de estacionamiento aproximadamente del tamaño de un campo de fútbol de 3.6 ha (9 acres) dentro de una urbanización, el sistema actuaría hidrológicamente como si fuera césped o pasto (Malcom, 2002).

Para el diseño de un sistema de manejo de aguas pluviales basado en concreto permeable, se deben considerar dos factores: permeabilidad y capacidad de almacenamiento e infiltración del suelo. El exceso de agua de escorrentía causado ya sea por una excesiva permeabilidad o por una capacidad de almacenamiento insuficiente, debe de prevenirse o evitarse.

Figura 4.32

Sección transversal típica de un pavimento de concreto permeable. Cuando la subrasante del pavimento está nivelada completamente horizontal, las diferentes capas proveen almacenamiento de agua pluvial: concreto permeable superficial (15% a 25% volumen de huecos vacíos), la subbase del pavimento (20% a 40% volumen de huecos vacíos), y sobre la superficie hasta la altura de la banqueteta (100% volumen de huecos vacíos).



Fuente: Modificado de Tennis et al., 2004.

- Permeabilidad.

En general, la limitación en la permeabilidad del concreto no es un parámetro crítico de diseño. Consideremos un sistema de pavimento de concreto permeable pasivo sobre un suelo con alto drenaje. El diseñador debe asegurar que la permeabilidad es suficiente para acomodar toda la lluvia que precipita en la superficie del concreto permeable. Por ejemplo: en un sistema con una tasa de infiltración de 140 L/m²/min (3.5 gal/ft²/

min), se necesitaría un evento de precipitación pluvial en exceso de 0.24 cm/s (340 in/h) antes de que la permeabilidad fuera un factor limitante. La permeabilidad de un concreto permeable no es un factor de control en el diseño. Sin embargo, la tasa de infiltración a través del subsuelo puede ser restrictiva.

- Capacidad de almacenamiento.

Típicamente la capacidad de almacenamiento de un sistema de concreto permeable se diseña para eventos específicos de precipitación pluvial, los cuales son dictados por requerimientos locales. El volumen total de lluvia es importante, pero la tasa de infiltración del suelo debe ser también considerada.

- Infiltración.

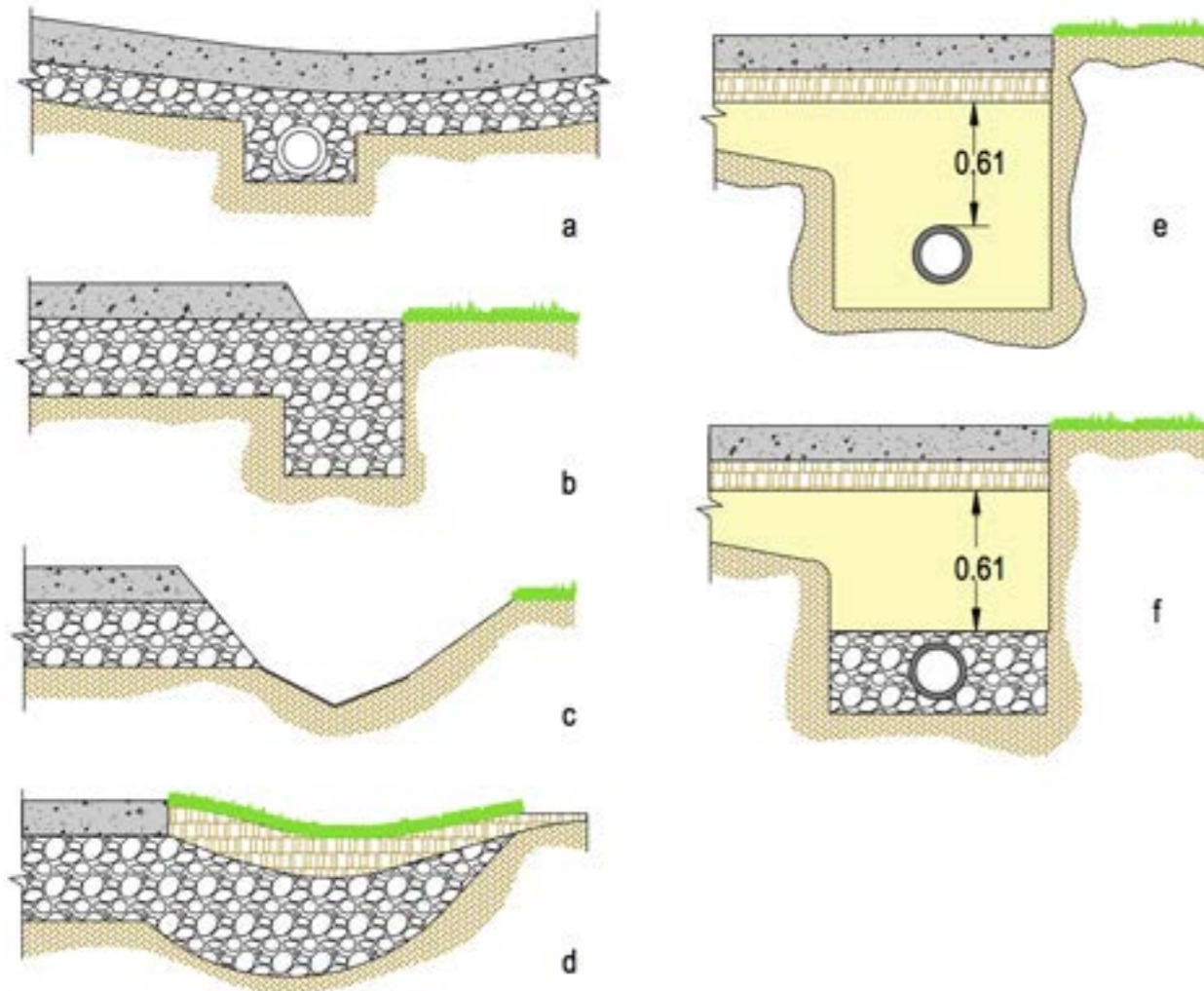
En ambos sistemas, pasivos y activos, la infiltración hacia la subrasante es importante. Resulta impreciso estimar la tasa de infiltración para propósitos de diseño, ya que el proceso de infiltración del agua en los suelos es complejo. Como regla general los suelos con una tasa de infiltración de 12 mm/h son apropiados para su uso en subrasantes debajo de pavimentos permeables.

Suelos arcillosos y otras capas de suelo impermeables pueden impedir el funcionamiento correcto de pavimentos permeables y puede ser necesario modificarlos para permitir retención y percolado apropiados de la lluvia. En algunos casos, las capas impermeables tendrán que ser excavadas y reemplazadas con suelo más poroso. Si los suelos son impermeables, un mayor espesor de base porosa debe de colocarse por encima de ellos. El espesor diseñado debe de proveer el volumen adicional de retención para cada proyecto en un sitio particular. Se ha usado grava o piedra con granulometría abierta, o suelos arenosos para retener y almacenar escorrentía superficial, reducir los efectos de la tormenta con escorrentía rápida, y reducir la compresibilidad del suelo. Para suelos nativos que son predominantemente arenosos y permeables, no se requiere generalmente una base con granulometría abierta, a menos que facilite el uso del equipo de colocación del pavimento permeable. Una subrasante de suelo arenoso o grava es apropiada para la colocación del concreto permeable.

Otra opción en áreas con suelos de poco drenaje es instalar pozos o canales de drenaje dentro de la capa subrasante hacia capas más permeables o áreas de retención de escorrentía tradicionales. Estos canales se rellenan con roca de granulometría cerrada y así permitir que el agua sea dirigida por los canales que conducen el agua a la recarga del manto freático (Figura 4.33). En este caso, se debe considerar la calidad del agua y cualquier problema que se pueda causar por contaminantes acarreados por el agua.

Figura 4.33

Ejemplos de sección transversal de diferentes configuraciones de drenaje para usarse sobre suelos impermeables: a) trinchera rellena con roca por debajo del pavimento; b) trinchera de roca a lo largo de la orilla del pavimento; c) trinchera en V; d) trinchera rellena de roca que se extiende hacia afuera del pavimento; e) subdrenaje de arena; f) subdrenaje de arena con trinchera rellena de roca.



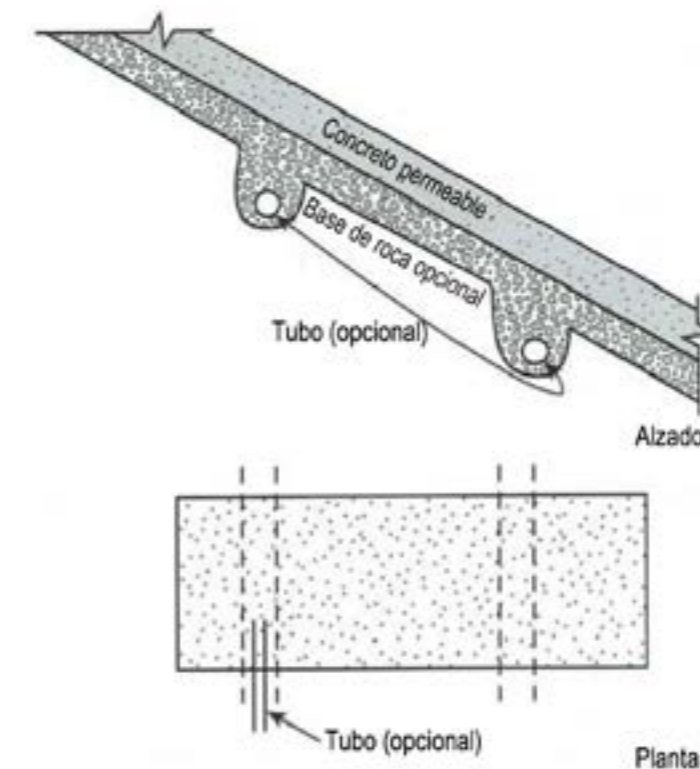
Fuente: Modificado de Tennis et al., 2004.

Un parámetro crítico en la colocación de un pavimento permeable es la uniformidad de la subrasante de soporte. Así como en otros tipos de pavimentos, las deformaciones por tráfico de camiones y otras irregularidades deben ser emparejadas, aplanadas y compactadas antes de la colocación del concreto. Para un soporte consistente de la subrasante, se recomienda frecuentemente la compactación a una densidad mínima de 90% a 95% de la densidad teórica. Debe hacerse hincapié en que el incremento en la densidad de la capa subrasante disminuye su permeabilidad. Los ingenieros geotécnicos locales serán la mejor fuente de conocimiento técnico en lo que concierne a las propiedades del suelo de la subrasante.

Ya que los pavimentos permeables contienen una cantidad mínima de agua y una alta porosidad, se debe de tener precaución para asegurar que el pavimento no pierda humedad prematuramente. La subrasante debe estar húmeda (sin encharcamientos) antes de la colocación, para prevenir la remoción de agua de la parte baja del pavimento demasiado pronto. Esta práctica es recomendada para la colocación de un pavimento de concreto convencional si existen condiciones de alta evaporación, pero es aún más importante en la colocación de concreto permeable, ya que el alto contenido de huecos permite una evaporación y secado más rápido, con la consecuente disminución de resistencia y durabilidad, aun en condiciones menos extremas.

Figura 4.34

Planos de elevación y de altura de una instalación inclinada.



Existen diferentes técnicas de colocación que se pueden usar en la construcción de pavimentos de concreto permeable; de manera similar al concreto convencional, las técnicas de colocación son desarrolladas para adaptarse a las condiciones específicas de la obra. Es importante hacer notar que las mezclas de concreto permeable no se pueden bombear con equipo mecánico, por lo que la planeación del acceso al sitio de la obra es importante. Antes de la colocación de la mezcla, la preparación de la subrasante y las cimbras deben ser verificadas para eliminar cualquier irregularidad, hendiduras o superficie desalineada.

Cada carga de concreto debe ser visualmente inspeccionada para verificar su consistencia y el recubrimiento del agregado. La consistencia dura (tiesa) del concreto permeable no permite que la prueba de revenimiento sea un método útil para utilizarse

como medida de control de calidad. La prueba de masa unitaria es la mejor prueba de rutina para monitorear la calidad y se recomienda hacerla en cada carga de concreto permeable recibida en la obra.

Figura 4.35

El concreto permeable se coloca primero y después se empareja la superficie con allanadora vibratoria.



Fuente: Tomado de R. Banka.

La consolidación se logra por medio de un rodillo de acero, compactando el concreto a la altura de la cimbra. Debido a la rápida evaporación y el endurecimiento de la mezcla, cualquier retraso en la consolidación puede causar problemas; generalmente, se recomienda que la consolidación del concreto permeable se complete dentro de los primeros 15 minutos después de su colocación.

Se deben colocar juntas de contracción si se desea prevenir el agrietamiento aleatorio del pavimento, no obstante, el espaciamiento de las juntas es normalmente mayor que para los pavimentos de concreto convencional porque los concretos permeables tienden a contraerse mucho menos. Se recomiendan espaciamientos de juntas de 6 m (20 pies) (Gulf Coast Power Association [GCPA], 1997), sin embargo, en algunas instalaciones se han llevado a cabo espaciamientos de juntas de 13.5 m (45 ft) o más, evitando agrietamiento aleatorio (Paine, 1992). Para prevenir el agrietamiento de reflejo aleatorio se deben instalar juntas en la misma posición que las de los pavimentos adyacentes. En la Figura 4.36 puede verse la junta alineada con la de la losa adyacente

ya instalada para evitar agrietamiento de reflejo y al extremo derecho de la fotografía se puede ver el rodillo de compactación usado. En el caso de pavimentos convencionales, la profundidad de las juntas de contracción debe ser igual a 1/4 del espesor de la losa para proporcionar un control de agrietamiento adecuado.

Figura 4.36

Concreto permeable después de emparejarlo (izquierda) y después de compactarlo (derecha).



Fuente: Tomado de R. Banka.

Ya que el tiempo de fraguado y la contracción son más aceleradas en la construcción de concreto permeable, la instalación de juntas debe llevarse a cabo tan pronto como se termine la consolidación, con una herramienta "rodillo para juntas" (ver Figura 4.37). Otra técnica utilizada para secciones pequeñas consiste en empujar (clavar) con un martillo una placa de acero recta a la profundidad requerida.

El corte de juntas con sierra también es posible, aunque no es un método preferido dado que la lechada que se produce en la operación puede introducirse y bloquear algunos de los huecos, lo que resulta en el desmoronamiento excesivo de las orillas de las juntas. Asimismo, para permitir el corte de juntas con sierra, se tiene que remover la cubierta de curado y, por consiguiente, se recomienda que antes de colocar la cubierta de curado otra vez, las superficies se vuelvan a humedecer.

Figura 4.37
Rodillo usado para hacer juntas,
comúnmente llamado *pizza cutter*.



Fuente: Tomado de R. Banka.

La estructura porosa y relativamente áspera de la superficie del concreto permeable expone más área superficial de la pasta de cemento a la evaporación, haciendo del curado una actividad aún más crítica e importante que en la instalación de concreto convencional. Se requiere agua para las reacciones químicas del cemento y es crítico que se aplique el curado de forma inmediata. En algunas regiones climáticas, es común aplicar un retardante de evaporación antes de la compactación para minimizar cualquier pérdida de agua en la superficie.

El curado debe de comenzar tan pronto como sea práctico después de la colocación, compactado y colocación de juntas. La mejor práctica recomienda que se inicie el curado dentro de los primeros 20 minutos después de estos procedimientos. Deben de tomarse en consideración la temperatura ambiente y las condiciones de viento, ya que éstos tendrán efectos más pronunciados comparado con pavimentos convencionales.

Figura 4.38
Instalación de pliegos o láminas de plástico para cubrir
el concreto permeable dentro de los primeros minutos
después de su consolidación, para así
evitar pérdida de agua por evaporación.



Fuente: Tomado de R. Banka.

4.2.4.2 Especificaciones técnicas para tecnosuelos

Los tecnosuelos han demostrado ser una excelente alternativa para la restauración de áreas degradadas, además de una ruta alternativa para resolver el problema de manejo de residuos sólidos urbanos e industriales. Su construcción se basa en la emulación de un suelo natural a partir de la selección de materiales semejantes en propiedades físicas o químicas. Se forman al realizar mezclas de materiales inorgánicos y orgánicos que tengan la capacidad de suministrar nutrientes, almacenar agua y aire para la permanencia de la vida de animales y las plantas, de esta manera posibilitan la revegetación y la restauración en las infraestructuras verdes.

Los principales usos que se les da a los tecnosuelos son: conservación de suelos en zonas agrícolas degradadas, mejora de suelos al permitir la infiltración de agua y coadyuvar a mejorar su calidad mediante la filtración de contaminantes, reutilización de material de tiraderos de cascajo y rehabilitación con vegetación de sitios abandonados. En zonas periurbanas se emplean para mejorar las propiedades de los suelos en jardines, camellones, y azoteas verdes en general, así como también como sustrato en viveros forestales para los planes de revegetación de la infraestructura vial.

Para el diseño y operación de los tecnosuelos no existen aún métodos para establecer proporciones de mezclas estándar, ya que el objetivo principal es la naturaleza de los materiales de desecho, y su diseño varía de acuerdo con las propiedades físicas y químicas de éstos. Lo que se propone para la creación de los tecnosuelos son lineamientos generales para diseñarlos.

Figura 4.39
Fotografía de zonas mineras restauradas con suelos artificiales a partir de residuos mineros.



Fuente: Tomado de <https://minariasostible.gal/es/touro-20-anos-de-investigacion-de-suelos/>

4.2.4.2.1 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS PARA SU CONSTRUCCIÓN

I. Conocer los tipos de residuos sólidos (RS) y el volumen generado en la obra.

Es necesario conocer las propiedades de los materiales de reciclaje que se van a reusar en la elaboración de los suelos artificiales, éstos se pueden clasificar en materiales inorgánicos y orgánicos. Los materiales que potencialmente pueden utilizarse para este fin son:

- Material inorgánico.
 - Residuos de excavación o movimiento de la obra.
 - Residuos de demolición de obras grises o civiles.
 - Sedimentos por procesos de desazolve de canales.
- Material orgánico.
 - Recuperación de la capa orgánica de los suelos de desmonte.
 - Lodos residuales de plantas de tratamiento.
 - Residuos de la agricultura (coco, agave, arroz, etc.).
 - Composta de residuos orgánicos de la ciudad o de la vegetación desmontada.

II. Conocer la demanda de material de acuerdo con las estructuras de la Infraestructura Verde Vial propuestas en la obra, tales como terrazas, cunetas, celdas biorretenedoras, humedales, etc., e identificar las propiedades requeridas de acuerdo con la función que se busca.

III. Caracterizar las principales propiedades fisicoquímicas de los materiales, tales como: pH, CE, contenido de C y N, textura, densidad de los materiales, metales pesados (en el caso necesario).

IV. Proponer las mezclas de acuerdo con la demanda y requerimiento de la infraestructura, considerando obtener materiales que cumplan funciones de:

- Soporte de vegetación: en este caso, se proponen mezclas que contengan al menos 30% de residuos orgánicos bien composteados y material inorgánico cuyo pH no supere los valores de 10 y su conductividad eléctrica no sea mayor a 4 mS/m.
- De acuerdo con las condiciones climáticas se deben considerar otros aspectos, como la capacidad de retención de agua o la infiltración, en estos casos, es necesario tener en cuenta el tamaño de los materiales que se incorporan en las mezclas.
- La profundidad del suelo es un criterio importante a considerar para el soporte de las plantas, ya que permite estimar el volumen de mezcla a preparar y los requerimientos de material y maquinaria necesaria para la construcción. En términos generales se proponen las siguientes profundidades:
 - Plantas herbáceas: profundidad de 10 a 20 cm.
 - Plantas arbustivas: profundidad de 20 a 50 cm.
 - Plantas arbóreas: profundidad > de 1 m.

Con base en este criterio, el volumen por m² o ha requerido para la construcción de un suelo artificial se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$V = A * P$$

Donde:

$V = \text{volumen (m}^3\text{)}$.

$A = \text{m}^2$.

$P = \text{profundidad del suelo (m)}$.

A partir de este volumen se calculan las proporciones de material que se requiere.

- Retención de agua: se propone mezclar material inorgánico de tamaño de partículas finas (menores a 0.5 cm) y residuos orgánicos bien composteados.
- Almacenamiento de agua: material inorgánico con diferentes tamaños entre 1 y 0.5 cm y materia orgánica en proporciones menores a 30%. Se sugiere adicionar al menos 5% de *mulch*.
- Infiltración: se sugiere utilizar tanto el material orgánico como inorgánico grueso, con tamaño dominante mayor a 1 cm.

La relación de mezcla entre los materiales orgánicos e inorgánicos se basa en permitir regular el pH entre 5 y 8.5, y mantener la conductividad eléctrica menor a 3 mS/cm una vez se realice la mezcla. Estas condiciones son importantes en los casos en donde el material esté destinado para el crecimiento de vegetación, situación que puede ser manejada utilizando especies resistentes a la salinidad.

Es importante mencionar que tanto el pH como la conductividad eléctrica se modifican rápidamente una vez se mezclan los materiales, este cambio es más evidente en los sitios en donde hay mayor disponibilidad de agua.

Otro de los riesgos que puede acarrear el manejo de residuos sólidos es la presencia de material contaminante. Es este caso, se sugiere manejar el pH de las mezclas para mantener el contaminante en condiciones no disponibles o móviles en agua. Así como también propiciar la incorporación de residuos como biocarbón o calcita, entre otros, los cuales permiten la inmovilización o retención de contaminantes químicos.

4.2.4.3 Especificaciones técnicas para sistemas inteligentes de transporte (conducción eficiente o *ecodriving*)

El *ecodriving* es una técnica que tiene como base la implementación de soluciones basadas en el conductor, por lo que es la conducta y forma de manejo de éste el factor que más influye en el consumo de combustible. La motivación proviene del latín “*motivus*” que significa movimiento y el sufijo (-ción) que expresa acción y efecto, por lo tanto, esta palabra significa estar “movido a hacer algo”. En este sentido, hay técnicas para fortalecer el *ecodriving* a través de la motivación, la cual se divide en dos tipos:

- Intrínseca: este tipo de motivación hace referencia al interés, curiosidad y diversión que una tarea causa. Con este tipo de motivación una persona explora, tiene una actitud de curiosidad y trabaja para aprender.

- Extrínseca: este tipo de motivación se debe a un factor externo que premia o castiga, o a la actitud positiva hacia una persona por la realización de una tarea por sí mismo en un contexto determinado.

El pensamiento conductista sugiere que la motivación extrínseca es el medio para animar a las personas a realizar cosas. Una recompensa o un castigo, aplicado de forma sistemática, condiciona o refuerza respuestas previas a una futura posible bonificación. Por el contrario, la teoría cognitiva afirma que el ser humano es inherentemente proactivo, pero el entorno tiene que ser compatible. En caso contrario, estos motivadores internos pueden verse frustrados. A diferencia del conductismo, esta teoría se centra en lo que necesita la persona para su crecimiento innato y su bienestar.

La modificación del comportamiento del conductor es una tarea ardua. Para resolver estos problemas, una estrategia es la gamificación. Este método consiste en utilizar elementos lúdicos en un contexto de no juego para favorecer la realización de tareas arduas y difíciles, como es la conducción. Ya que en este contexto los usuarios necesitan saber qué tan bien están realizando determinada actividad o tarea, se recomienda la retroalimentación informativa sobre el progreso en la realización de dicha actividad, lo cual se puede realizar mediante gráficos, y representa un buen mecanismo para motivar al usuario para que finalice la tarea. En este sentido, hoy en día dentro de los dispositivos móviles o el mismo automóvil se tienen aparatos GPS, acelerómetros, giroscopios, etc., y diversas tecnologías de comunicación como el Wi-Fi, el bluetooth y el sistema de coordenadas UTM, que permiten monitorear el comportamiento del conductor y proveerle retroalimentación para que mejore su conducción.

Para que el *ecodriving* sea adecuadamente ejecutado el conductor debe tener conocimientos sobre conducción eficiente, y normalmente en las autoescuelas no forman a los alumnos para que conduzcan de esta forma. Una de las medidas que los gobiernos podrían adoptar para reducir el consumo de combustible es ofrecer cursos sobre conducción eficiente. El conocimiento sobre este estilo de conducción debe ser sólido; en algunos estudios se ha constatado que algunos conductores obtuvieron peores resultados después de recibir clases sobre conducción eficiente. Como se ha mencionado, la malinterpretación de los consejos de conducción eficiente puede provocar además situaciones de peligro.

La motivación continua es fundamental, ya que cambiar los hábitos de conducción es muy difícil. Los conductores necesitan un incentivo, que debe variar según el tipo de conductor. Los motivos y los incentivos para conducir de forma eficiente son el tiempo, el consumo de combustible, el ambiente y la posibilidad de cambio. En este sentido, a los conductores les agrada saber cuánto dinero están ahorrando y su consumo de combustible en cada viaje, así como el impacto que ha minimizado su mejora en la conducción sobre el ambiente.

Asimismo, el diseño de la carretera y su mantenimiento forman parte fundamental de las estrategias para minimizar los gases de efecto invernadero. Se ha visto que cuando se pavimenta una carretera las emisiones disminuyen en el caso de los camiones y autobuses, pero en los autos livianos y camiones la variación está asociada a la geometría, siendo más relevantes aspectos como la curvatura y la cantidad de superficie en subidas y bajadas (m/km), ya que esos aspectos pueden condicionar las velocidades y, por lo tanto, las emisiones. Por ejemplo, en las carreteras que tienen mejores especificaciones y se pavimentan, la velocidad promedio pasa de 50 km/h a 100 km/h, y para velocidades muy altas el consumo de combustible es mayor y por ende, las emisiones aumentan.

4.2.4.3] CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS PARA SU IMPLEMENTACIÓN

De acuerdo con Díaz-Jaimes (2020) para que exista una disminución de las emisiones cuando se plantea el mejoramiento del trazado de una carretera, éste debe depender de las condiciones existentes, ya que si se tiene una carretera muy recta y plana las altas velocidades generan grandes emisiones y para que éstas disminuyan, la intervención debe considerar el aumento de la curvatura y de las subidas + bajadas (m/km), y si por el contrario la carretera es muy sinuosa y ondulada se debe disminuir tanto curvatura como las subidas + bajadas (m/km).

La pavimentación de una carretera por sí misma no disminuye las emisiones, éstas van a depender de qué tanto aumente la velocidad de los vehículos, por lo que también se debe intervenir en el trazado de la carretera.

Cada proyecto tiene sus propias condiciones y características y no es válido decir que siempre determinada intervención es buena o mala porque depende de las condiciones existentes en las carreteras. Cada especialista deberá determinar cómo hacer más eficiente la conducción del usuario.

Es necesario contribuir e invertir en investigaciones donde se estudien temas como la influencia del tipo de combustible en las emisiones provenientes de los vehículos, el uso de nuevos combustibles y tecnologías y estilos de conducción denominados verdes, entre otros, y así encontrar formas para mitigar la contaminación proveniente del uso de la infraestructura vial, ya que las afectaciones al ambiente y a la salud humana cada vez son mayores.

Implementar este tipo de sistemas inteligentes de transporte requiere de la generación e implementación de políticas públicas y campañas de conducción consciente, además del monitoreo constante de las aplicaciones y servicios informáticos y tecnológicos que desarrollan estos sistemas. Respecto al último punto, el monitoreo de este tipo de sistema debe involucrar a la sociedad y sus gobiernos, ya que no sólo se trata de una cuestión en materia de seguridad vial y bienestar humano, sino que representa la posibilidad de actuar directamente en favor de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y del consumo de combustible.

Finalmente, la industria automotriz también ofrece tecnologías y dispositivos que inciden sensiblemente en la mejora de los hábitos de conducción, permitiendo a los usuarios lograr ahorros importantes (*ecodriving*). Los fabricantes proporcionan consejos para ahorrar combustible, y se logra también aumentar la seguridad en el manejo y otros beneficios, como alargar la vida de los motores y, en general, de los vehículos. En la página del gobierno mexicano <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/eco-driving>, se tienen los sistemas *ecodriving* de algunas marcas y una serie de recomendaciones con el fin de mejorar los hábitos de conducción.

4.2.4.4 Especificaciones técnicas para bajo puentes

Para implementar bajo puentes, el primer criterio de su construcción debe ser la claridad desde el diseño de los proyectos de Infraestructura Verde Vial, esto, con el objetivo de evitar irregularidades y fracasos en su construcción. El diseño de los bajo puentes estará determinado por las necesidades o principios culturales de la población, de esta manera se pretende generar identidad para que pueda existir una apropiación de este tipo de espacios por parte de las comunidades, lo que facilita en gran medida

el uso, el cuidado y la operación de la infraestructura, de lo contrario, es posible que el proyecto fracase e incluso sea destruido.

4.2.4.4.1 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS PARA SU CONSTRUCCIÓN

- Durante su construcción debe existir una amplia participación de la ciudadanía, acompañada de una gestión institucional; esta acción de cooperación colectiva favorece el uso adecuado y mantenimiento de los espacios recuperados, generando el cuidado de éstos por parte de los usuarios y un acompañamiento constante de los recursos necesarios para su funcionamiento por parte de las instancias públicas.
- El diseño de la infraestructura debe mantener desde las primeras etapas un respeto al medio natural y debe seguir una serie de lineamientos que tengan como objetivo hacer sinergia con el espacio ambiental ya establecido. Lo anterior genera la menor cantidad de alteraciones a las regiones recuperadas o construidas. Asimismo, se busca hacer conciencia a la población respecto del uso y respeto de la infraestructura.
- Durante las etapas de planeación y diseño de las propuestas de rescate o construcción de espacios públicos es importante realizar y tomar en cuenta un análisis de pertinencia, esto, con base en las necesidades de la población en la región, lo que permite que las propuestas que se desarrollen sean acordes a las necesidades reales de las comunidades locales.
- Se recomienda que estos espacios cuenten con espacios verdes, dentro de los cuales se incluyan árboles, arbustos, y vegetación con flores, transformando así una infraestructura gris en una verde. La vegetación propicia una sana convivencia entre el entorno urbano y la naturaleza, por lo que se recomienda colocar amplias áreas verdes dentro de los espacios recuperados, grises y/o urbanos, no sólo para mejorar el aspecto visual, sino también para mejorar la experiencia de los usuarios al momento de utilizar dichos espacios. En este sentido, debido a la relación simbiótica que existe entre los seres humanos y la naturaleza es necesario que los lugares rescatados cuenten con una vegetación adecuada, y no sólo que sirva como ornamento, sino que también represente algún beneficio ambiental. En general, se puede asegurar mediante la observación que la gente disfruta caminar por espacios con áreas verdes o adaptados con elementos paisajísticos verdes que proveen espacios de inspiración.
- Dependiendo de cada espacio se determina la cantidad y el tipo de áreas verdes que se necesitará.
- Otro factor importante en el diseño y disposición de la vegetación es considerar que los bajo puentes son espacios cuya ubicación puede hacer de estos sitios lugares desfavorables para los usuarios debido a la contaminación y el ruido. En este sentido, la vegetación puede ser un factor que amortigüe estos problemas, pero también se puede pensar en otras maneras complementarias de amortiguar dichos impactos desde una perspectiva más tecnológica.
- Debe de existir un manual de operación del área para que los usuarios puedan hacer buen uso del espacio.

A continuación se muestran algunas imágenes que muestran ideas para el desarrollo de los bajo puentes.

Figura 4.40

Diseño de actividades lúdicas y recreativas para aprovechar el espacio.
Taman Park, en Bandung, Indonesia.



Fuente: Tomado de https://elpais.com/elpais/2020/12/28/del_tirador_a_la_ciudad/1609172096_433857.html

Figura 4.41

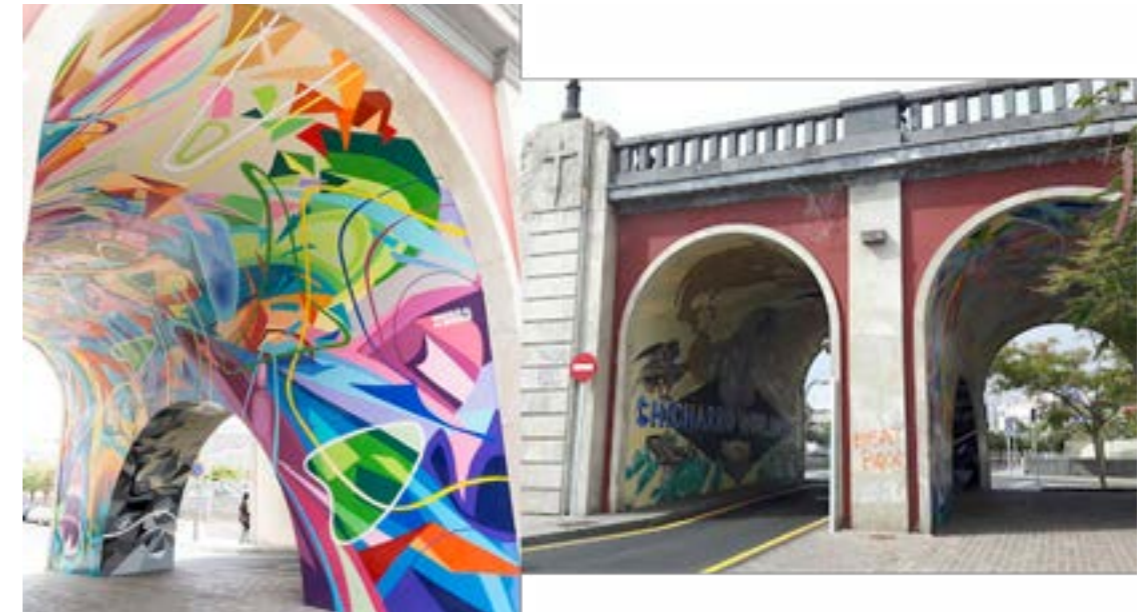
Diseño de bajo puente para actividades deportivas.
Skatepark en el Centro de Vancouver, Canadá.



Fuente: Tomado de https://elpais.com/elpais/2020/12/28/del_tirador_a_la_ciudad/1609172096_433857.html

Figura 4.42

Diseño arquitectónico de graffiti en bajo puente.



Fuente: Tomado de <https://www.pinterest.com.mx/pin/406520303847892672/>

Figura 4.43

Corredor utilizado como espacio comunitario para peatones y ciclistas.
Propuesta para la autopista Rockaway Queens, Nueva York.



Fuente: Tomado de <https://www.plataformaurbana.cl/archive/2015/06/29/seis-propuestas-para-recuperar-los-espacios-perdidos-bajo-una-autopista-de-nueva-york/>

4.2.5 Síntesis de los requerimientos de diseño y construcción de los componentes de la Infraestructura Verde Vial

A manera de resumen para este apartado, en la Tabla 4.13 se presenta una síntesis de los requerimientos generales de diseño y construcción de los diferentes tipos de componentes de la Infraestructura Verde Vial.

Componentes que brindan						
Infraestructura Verde Vial	Tipo de servicio	Tipo de clima	Temperatura	Precipitación	Pendiente %	Tipo de terreno
Terrazas de declive	Infiltración	Húmedo	No aplica	> 800 mm	> 5%	Laderas
Terrazas de nivel	Almacenamiento	Semiáridos / áridos				
Cunetas verdes	Transporte	Todos menos desérticos/ áridos	15-25	350-1600 mm	5-10%	Plano
Cunetas secas		Todos menos desérticos/ áridos				
Cunetas húmedas	Filtración/infiltración					
Franjas filtrantes	Transporte/filtración				Máx 10%	
Jardines microcuena	Retención	Todos	No aplica	> 1600 mm	< 10%	
Drenes filtrantes	Transporte	Todos menos desérticos/ áridos	15-25	350-1600 mm	< 2%	
Estanques y humedales	Filtración/infiltración		15-25		Terrenos planos	Hondonada
Cuencas de retención	Filtración	Todos	15-25			Hondonada
Pozos de infiltración	Infiltración	Todos	No aplica	No aplica		Terrenos planos y hondonados

Componentes que brindan						
Infraestructura Verde Vial	Tipo de servicio	Tipo de clima	Temperatura	Precipitación	Pendiente %	Tipo de terreno
Sistemas de energía solar	Generación de energía	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Sistemas de energía eólica	Generación de energía					
Pantallas acústicas	Control de ruido					
Pasos para fauna	Conectividad	Todos	No aplica	Dependerá del tipo de paso que se quiera colocar.		
Pavimentos permeables	Alivio y manejo de flujos de escorrentía excesiva con capacidad de almacenamiento y retención, filtrado de contaminantes, y recarga de manto freático en subsuelo	Cualquiera	Cualquiera	Zonas lluviosas con eventos de precipitación pluvial relativamente grandes	Menor a 7-8 grados (16%)	Cualquiera donde el nivel del manto freático se encuentre a 2 metros o más por debajo de la superficie
Tecnosuelos	Restauración del suelo a partir de materiales reciclados	Todos				
Ecodriving	Reducción de emisiones de GEI	Todos				
Bajo puentes	Lúdico y recreativo	No aplica				

Tabla 4.13

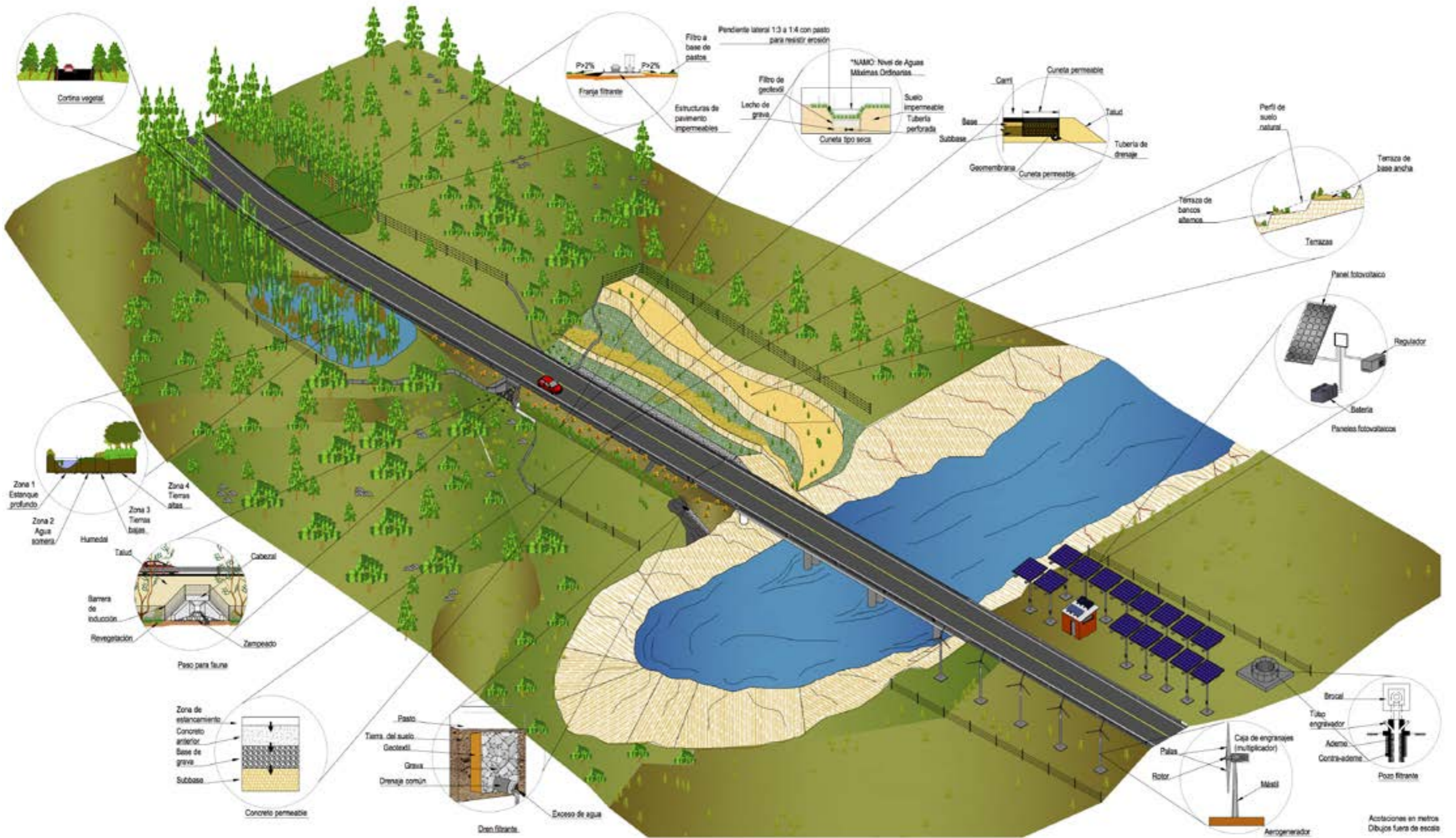
Síntesis de los requerimientos de diseño y construcción de los diferentes componentes que pueden conformar la Infraestructura Verde Vial.

servicios ecosistémicos								
Tipo de vegetación	Diseño de plantación	Estratos	Tipo de suelo	Velocidad del viento	Niveles de radiación	Obstáculos	Orientación	Tasa de infiltración de agua
Todas	Tresbolillo	Arbóreo y arbustivo	Poco profundo, textura media	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
	Marco real; tresbolillo	Arbustivo y herbáceo	Textura gruesa					
	Todas		Textura fina					
		Todos	Textura media					
	Tresbolillo		Textura muy gruesa					
Acuática	Nezahualcóyotl; tresbolillo		Textura fina					
Todas	Todas		Textura gruesa	No aplica				
Acuática	Nezahualcóyotl; tresbolillo							

servicios ambientales								
Tipo de vegetación	Diseño de plantación	Estratos	Tipo de suelo	Velocidad del viento	Niveles de radiación	Obstáculos	Orientación	Tasa de infiltración de agua
Pastos y herbáceas. Las franjas de árboles pueden funcionar como pantalla acústica	No aplica	Todos		No aplica	Mínimo 300W/m ²	Libre	Al sur	No aplica
				2 a 5 m/s min, 25 m/s máx.	No aplica	Velocidad de viento mínima de 2-5 m/s con máximos de 25 m/s	No aplica	
Todas	Todas			No aplica		No aplica		
Ver Manual de diseño de pasos para fauna silvestre en carreteras (SCT, 2021)								No aplica
Pastizales	Marco real; tresbolillo	Todos	Cualquiera. Arenosos o de granulometría abierta son más favorables	Cualquiera, tomar precauciones durante la construcción para evitar el secado- evaporación de agua durante el curado o hidratación del cemento	No aplica	No aplica	No aplica	Desde 120 a 700 L/m ² /min
		No aplica	Tecnosoles, antroposoles o suelos perturbados en general		No aplica			Todas
				No aplica				
				No aplica				
	Todas					No aplica		

Figura 4.44

Esquema general de un diseño de Infraestructura Verde Vial aplicado en carreteras.





COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA
DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA DE OPERACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE VIAL

En este capítulo se presentan lineamientos y recomendaciones para la operación y conservación de los componentes de la Infraestructura Verde Vial. Se establecen los principales pasos a manera de guía para operar y dar conservación a proyectos de Infraestructura Verde Vial, en función de que los elementos que la componen puedan ser correctamente manejados para conservar sus propiedades y funciones, y con ello permitir que sigan brindando los servicios ecosistémicos y ambientales para los que fueron diseñados durante toda la vida útil de la Infraestructura Verde Vial.

5.1 Operación y conservación de los componentes de la Infraestructura Verde Vial en materia de servicios ecosistémicos

Todos los trabajos de operación y conservación deberán tener en cuenta la protección del suelo, el ciclo hidrológico, el hábitat y los servicios ecosistémicos asociados a la Infraestructura Verde Vial. Los regímenes de conservación y monitoreo de los componentes deben ser periódicos para asegurar que se siga cumpliendo con el servicio para el cual se construyeron.

La conservación de los componentes de la Infraestructura Verde Vial es muy importante porque de este modo se permite el éxito de los diseños a largo plazo. De acuerdo con el tipo de estructura es necesario realizar diferentes tareas que implican su desarrollo con diferente frecuencia. Las acciones de conservación y mantenimiento se dividirán entre aquellas que se realicen de manera periódica y aquellas que se realicen de forma ocasional, es decir, de forma mucho menos frecuente y predecible que las tareas de mantenimiento regular. El mantenimiento regular o periódico consiste en tareas básicas llevadas a cabo con un cronograma frecuente y establecido, que incluyen inspecciones/monitoreo, remoción de sedimentos o aceite (p. ej. en carreteras), manejo de vegetación, barrido de superficies y remoción de basura y escombros.

En general, para las estructuras de Infraestructura Verde Vial que tengan superficies vegetadas, como son las franjas filtrantes o las cunetas verdes, es necesario reali-

zar inspecciones periódicas y labores de limpieza, poda y control de la vegetación, así como control de especies invasoras, mientras que los elementos de almacenamiento necesitarán limpiezas anuales para eliminar los elementos sólidos, basuras y residuos. Además, de acuerdo con el tipo de vegetación y la región, será necesario realizar abono y riego.

Otro elemento indispensable y aplicable para los componentes de la Infraestructura Verde Vial que brindan servicios ecosistémicos es la accesibilidad para la realización de las acciones de conservación. La buena práctica de mantener y conservar las vías de acceso aminorará los tiempos de mantenimiento, que se traducen en menores costos, mejoras en la operación y una fácil primera inspección visual.

Cuando ocurren problemas con estructuras de la Infraestructura Verde Vial que poseen vegetación en la superficie, los procesos de inspección y mantenimiento pueden ser obvios y pueden remediarse usando prácticas estándar de jardinería o ingeniería. Sin embargo, éste no es siempre el caso, especialmente con sistemas más complejos, como los sistemas de biorretención y sistemas donde intervengan procesos de infiltración y recarga de acuíferos. Si cualquier sistema (ya sea por encima o por debajo del suelo) se diseña, supervisa y mantiene adecuadamente, el deterioro del rendimiento generalmente se puede minimizar.

Los diferentes elementos que integran la Infraestructura Verde Vial, su diseño, la diversidad en el tipo de azolves, la variación en los caudales y la duración de la temporada de lluvias generarán diferentes requisitos de operación y conservación, los cuales serán determinados por los especialistas que diseñen y construyan esos sistemas, sin embargo, a continuación se presentan algunas generalidades para optimizar su funcionamiento.

5.1.1 Operación y conservación de la vegetación en el derecho de vía

Es muy común pensar que las tareas de siembra y plantación terminan al momento de colocar la vegetación. No obstante, es necesario seguir proporcionando cuidados a la vegetación hasta que ésta se encuentre bien establecida y muestre un crecimiento dentro de lo esperado, manteniéndola libre de malezas, plagas y enfermedades. Para ello, es preciso realizar al menos dos limpiezas o retiro de las malezas al terreno o sitio revegetado de forma anual.

Cuando la plantación o siembra se realiza al inicio de la época de lluvia, la humedad será suficiente para el establecimiento de los elementos de la plantación, excepto en las zonas áridas con extrema ausencia de temporada de lluvias, por lo que la necesidad de regar dependerá del volumen de la precipitación y de su distribución a lo largo del año.

La implantación de vegetación requiere de una adecuada planeación para minimizar el riesgo de mortandad. A continuación se mencionan los aspectos que deben tomarse en cuenta para mantener a la vegetación en buen estado y cumpliendo los objetivos para los cuales fue diseñada.

I. Riego.

- En primavera las plantas requieren más agua que en invierno.
- En suelos húmedos o arcillosos que retienen agua, se necesitará menos riego. Si los suelos son muy secos o arenosos, se necesitará un mayor volumen de agua.
- Si las plantas están demasiado expuestas al sol, necesitarán más agua que a la sombra.
- Si en el terreno corre mucho más viento, se requerirá más riego.
- Las suculentas requieren de menor riego que las herbáceas y los pastos.
- Se deben realizar los riegos desde el momento que en que se da por iniciada la plantación y por un lapso no menor de 2 años, se deberá regar las veces que sea necesario, dependiendo del clima o los cambios climáticos que se den en el área revegetada.

II. Deshierbe.

- Se deberán quitar las malezas que afecten el crecimiento de los individuos y deberá hacerse precisamente al comienzo de la época seca y antes de regar las plantaciones, evitando así la proliferación de las semillas de las especies no deseadas.
- Se recomienda sólo realizar el deshierbe alrededor de las plantas introducidas y dejar que en los demás sitios las malezas crezcan favoreciendo la recuperación y protección del suelo. El número de deshierbes a realizar en el año depende de qué tan abundante sea el crecimiento de las malezas. En climas muy húmedos se recomienda realizar deshierbe cada mes en la temporada de lluvias. Pero en climas secos, basta con un deshierbe al inicio de las lluvias y otro a mitad de la estación.
- Los deshierbes deben dejarse de practicar hasta que el tamaño de la planta sea suficiente para librar la competencia por luz. Una práctica que es muy recomendable y que, a mediano plazo, puede evitar seguir realizando los deshierbes, es depositar la materia vegetal producida en esta práctica en la base de la planta, con esto se fomenta una cubierta densa que impide el crecimiento de las malezas, además, se proporciona nutrientes a la planta y capta humedad. O bien, si el terreno es pedregoso, conviene colocar en la base de la planta piedras que imposibiliten el crecimiento de las malezas.

III. Control de plagas.

- Si éste es el caso, su control debe de partir del diagnóstico preciso del tipo de plaga que está afectando a la planta y con base en el resultado se debe prescribir el tratamiento más adecuado.

IV. Nutrientes.

- Otra causa que puede afectar el crecimiento y aspecto saludable de la planta es la falta de elementos nutritivos en el suelo. Si de antemano se sabe que el suelo tiene deficiencias, es conveniente aplicar los insumos que lo reviertan y no esperar hasta que la planta muestre los síntomas.
- Muchas veces la falta de nutrientes se presenta tiempo después del trasplante, debido a que la planta ha tomado todos los elementos nutritivos del suelo y no está habiendo un buen reciclamiento. Cuando esto ocurre, es necesario proporcionarle los elementos nutritivos necesarios para su crecimiento, por medio de fertilizaciones periódicas. No se puede recomendar una dosis ni un producto en particular, ya que esto depende de las condiciones particulares de cada caso y deberá ser determinado por un especialista en botánica o área afín.

V. Poda.

- Se recomienda en el caso de que se quiera dirigir el crecimiento de las especies hacia un fin productivo específico o cuando se pretenda equilibrar el desarrollo de la parte aérea (tallo, ramas y hojas) con el desarrollo de la raíz. La época de realizar la poda generalmente es en la etapa de descanso vegetativo de la planta, seleccionando aquellas ramas que interfieran en la forma de crecimiento deseado.

5.1.2 Operación y conservación de terrazas en taludes de corte, terraplén y/o laderas

Los sistemas de terrazas pueden modificarse a lo largo del tiempo por la agresividad del clima y el crecimiento de la vegetación, los cuales pueden remover los muros de las terrazas y cambiar la nivelación de éstas. Por lo tanto, las principales actividades de conservación de estas estructuras son:

Reparación de muros que conforman las terrazas. Éstos se sostienen a partir de los postes verticales y horizontales, y pueden deteriorarse después de un evento de lluvia fuerte o por el crecimiento de vegetación arbustiva. Se recomienda realizar el monitoreo de los muros una vez al año para evaluar la necesidad de tareas de conservación.

Nivelación de terrazas. Si los postes son modificados, el nivel de la terraza cambia y por lo tanto, es necesario ejecutar renivelación de las curvas de nivel una vez que se reparen los postes de los muros.

Limpieza y reparación de canales y zanjas. Esto permite disminuir la escorrentía superficial y mantener el funcionamiento de las terrazas a largo plazo, ya que canales y zanjas pueden azolverse a través del tiempo. Es necesario realizar las tareas de limpieza y desazolve de estos sistemas al menos una vez al año.

En la siguiente Tabla se presentan las principales actividades operativas y de conservación para mantener el buen funcionamiento de las terrazas, así como la frecuencia recomendada para su realización.

Tabla 5.1
Requisitos de operación y conservación de sistemas de terrazas.

Tarea	Frecuencia	Comentarios
Terrazas		
Estabilización de suelo superficial.	Al inicio de la obra o cuando la situación lo requiera.	<ul style="list-style-type: none"> • En algunas ocasiones, las propiedades del suelo no permiten una fácil estabilización y el crecimiento de la vegetación como estrategia no da espera a los procesos de erosión. En este caso se recomienda el uso de coagulantes o floculantes que eliminan las partículas en suspensión de los escurrimientos y ayudan a la floculación de éstas para la estabilización de las terrazas. En suelos de pH ácido puede suceder, por lo tanto, el encalado cumple esa función de ayuda a la floculación.
Reparación de muros.	Revisar 1 vez por año, antes y después de las lluvias.	<ul style="list-style-type: none"> • En áreas de precipitación alta existe el riesgo de movimiento de tierras y desestabilidad de los muros que contienen las terrazas. Es necesario realizar monitoreos de este elemento con mayor frecuencia en las zonas de montañas. Se pueden proteger los muros con pasto o hierba perenne. • Se debe impedir el crecimiento de árboles al lado de los muros, para evitar que éstos los dañen.
Limpieza de canales.	Revisar 2 veces por año.	<ul style="list-style-type: none"> • Es importante mantener libres de sedimentos, tierra y vegetación los canales que permiten drenar y conducir el agua fuera de la zona de terrazas.
Revegetación/ reforestación	Revisar 2 veces por año	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo de la sobrevivencia de las especies utilizadas en las terrazas y si no se da una buena adaptación de éstas, cambiar la especie.

5.1.3 Operación y conservación de cunetas verdes

Las cunetas verdes requerirán conservación regular, esto es fundamental para el funcionamiento exitoso de toda estructura de la Infraestructura Verde Vial relacionada con algún proceso de filtración y es requisito indispensable para garantizar que las cunetas mantengan una operación continua y brinden el servicio de drenaje para el que son implementadas principalmente. Un deficiente trabajo de conservación provocará la pérdida en su capacidad para conducir el agua a la velocidad de diseño y en consecuencia, se tendrá agua estancada y materiales contaminantes en el agua y cuerpos receptores.

Al tratarse de estructuras asociadas a vías de comunicación, la remoción de basura y escombros debe realizarse como parte de la conservación general de forma regular y antes de cualquier otra tarea de gestión.

Para las cunetas secas en particular se destaca la necesidad de realizar el corte de césped o vegetación elegida. Lo ideal es que la poda alcance una longitud de vegetación de 75 a 150 mm a lo largo de la superficie principal para ayudar a filtrar los contaminantes y retener los sedimentos y reducir el riesgo de aplanamiento durante los eventos

de escorrentía. En este sentido, los cortes de césped tendrán una periodicidad que permita mantener esas alturas y los residuos del corte deben desecharse fuera del sitio o fuera del área de la cuneta para eliminar el aporte de los nutrientes y contaminantes.

Para las cunetas húmedas no se requiere cortar la vegetación. Sin embargo, la recolección de vegetación muy densa puede ser deseable en el otoño después de la muerte de algunos tipos de plantas para evitar la descarga de material orgánico en exceso en las aguas receptoras (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

Con cierta periodicidad y dependiendo de las condiciones ya mencionadas, será necesario eliminar los sedimentos (p. ej. una vez que los depósitos superen los 25 mm de profundidad), aunque esto puede minimizarse asegurando que las áreas aguas arriba estén estabilizadas e incorporando dispositivos de pretratamiento eficaces. Sin embargo, en la infraestructura vial, el operador de la vía de comunicación deberá tomar en cuenta la ocurrencia de accidentes y percances que tengan como consecuencia el derrame de aceites, combustibles o algún material peligroso que requiera tareas de conservación mayores o incluso la reconstrucción de la cuneta verde.

En particular, al finalizar el periodo de construcción de las cunetas, el riego será necesario durante el periodo en que las raíces de la planta profundizan y puede ser imprescindible en periodos de poca lluvia o en regiones áridas o semidesérticas.

El control de la erosión en las cunetas verdes durante sus primeros dos meses debe ser bastante minucioso y posterior al primer evento de lluvias, todo ello para vigilar y corroborar el correcto funcionamiento de la cuneta y que la vegetación, que actuará como primer filtro, esté completamente consolidada.

Tabla 5.2

Resumen de los requisitos de operación y conservación para cunetas verdes.

Programa de conservación	Acción requerida	Frecuencia típica
Conservación regular	Retirar la basura y los escombros.	<ul style="list-style-type: none"> Semanal o mensualmente, o según sea necesario, de acuerdo con el tránsito de la vía y su cercanía con núcleos urbanos y servicios.
	Cortar el césped para mantener su altura dentro del rango de diseño especificado.	<ul style="list-style-type: none"> Mensualmente (durante la temporada de crecimiento) o según sea necesario.
	Manejar otra vegetación y eliminar plantas invasoras.	<ul style="list-style-type: none"> Mensualmente en un inicio, luego según sea necesario.
	Inspeccionar las entradas, salidas y desbordamientos en busca de bloqueos, y limpiar si es necesario.	<ul style="list-style-type: none"> Mensualmente.
	Inspeccionar las superficies de infiltración en busca de encharcamientos, compactación, acumulación de limo, registrar las áreas donde el agua se encharca durante > 48 horas.	<ul style="list-style-type: none"> Mensualmente, o cuando sea necesario.
	Inspeccionar la cobertura de vegetación.	<ul style="list-style-type: none"> Mensualmente durante 6 meses, trimestralmente durante 2 años, luego semestralmente.

Programa de conservación	Acción requerida	Frecuencia típica
	Inspeccionar las entradas y la superficie de la instalación en busca de acumulación de sedimentos (como la bahía de carga, donde es más probable que se acumule), establecer las frecuencias apropiadas de remoción de sedimentos.	<ul style="list-style-type: none"> Semestralmente.
Conservación ocasional	Volver a sembrar áreas con crecimiento deficiente de vegetación, alterar los tipos de plantas para que se adapten mejor a las condiciones si es necesario.	<ul style="list-style-type: none"> Según sea necesario o si el suelo descubierto está expuesto en más del 10% o más del área de tratamiento de la cuneta.
Acciones de remediación	Reparar la erosión u otros daños cambiando el césped o sembrando de nuevo.	<ul style="list-style-type: none"> Según sea necesario.
	Volver a nivelar las superficies irregulares y restablecer los niveles de diseño.	<ul style="list-style-type: none"> Según sea necesario.
	Escarificar y pinchar la capa superior del suelo para mejorar el rendimiento de la infiltración, romper los depósitos de limo y evitar la compactación de la superficie del suelo.	<ul style="list-style-type: none"> Según sea necesario.
	Remover la acumulación de sedimentos.	<ul style="list-style-type: none"> Según sea necesario.
	Remover y disponer de los residuos de aceite o gasolina utilizando practicas estándar seguras.	<ul style="list-style-type: none"> Según sea necesario.

5.1.4 Operación y conservación de franjas filtrantes

Así como las cunetas, las franjas filtrantes necesitan contener y mantener la cobertura vegetal con una longitud adecuada. Idealmente, deben tener longitudes de 75 a 150 mm en la superficie principal para ayudar a filtrar contaminantes y retener sedimentos, así como reducir el riesgo de aplanamiento durante eventos de escorrentía.

La conservación de estos sistemas se concentra en actividades que permitan la eliminación de sedimentos provenientes de los escurrimientos cargados de materiales de zonas arriba. Los sedimentos acumulados inhiben el flujo de agua y al arrastrar material vegetal e inorgánico generan bancos de sedimentos a lo largo de las estructuras, reduciendo la eficiencia de regulación, infiltración y filtración. Es por ello que ocasionalmente será necesario eliminar los sedimentos (p. ej. una vez que los depósitos superen los 25 mm de profundidad), aunque esto puede minimizarse asegurándose de que las áreas aguas arriba estén completamente estabilizadas con anticipación. La evidencia disponible de los estudios de monitoreo indica que las pequeñas prácticas de infiltración distribuida, como las franjas filtrantes, no contaminan los suelos subyacentes, incluso después de más de 10 años de operación (Toronto and Region Conservation Authority [TRCA], 2008).

Asimismo, los sedimentos acumulados cubren la vegetación, la ahogan y provocan la muerte de las plantas. De suceder, las plantas muertas deben remplazarse para mantener una cobertura consistente. Es posible que sea necesario volver a sembrar algunas áreas después de que se haya eliminado el sedimento acumulado.

Las franjas filtrantes requerirán de tareas de conservación típicas del césped, incluida la eliminación de la paja y la aireación. También deben mantener un crecimiento del césped uniforme, bajo y denso para garantizar el flujo difuso a través del sistema. El césped requiere podar al menos una vez al mes (cada dos semanas es mejor) durante la temporada de crecimiento. Una regla general es nunca quitar más de un tercio de la hoja durante el corte. No se debe cortar el césped inmediatamente después de un evento de lluvia o cuando el suelo está saturado para evitar surcos que pueden causar áreas de compactación o reconcentración de flujo difuso.

La planificación de las tareas de conservación debe desarrollarse durante la fase de diseño y deberán tener los mismos cuidados iniciales que las cunetas verdes, todo ello para no tener secciones no vegetadas de las franjas filtrantes, ni favorecer encharcamientos y depósitos de sedimentos preferenciales.

Tabla 5.3**Requisitos de funcionamiento y conservación de las franjas filtrantes.**

Programa de conservación	Acción requerida	Frecuencia típica
Conservación regular	Retirar basura y escombros.	<ul style="list-style-type: none"> Mensual o según sea necesario.
	Cortar el césped para mantener su altura dentro del rango de diseño especificado.	<ul style="list-style-type: none"> Mensualmente durante la temporada de crecimiento, o según sea necesario.
	Manejar otra vegetación y eliminar plantas invasivas o molestas para el diseño y función.	<ul style="list-style-type: none"> Mensual al inicio y luego según sea necesario.
	Inspeccionar la superficie de la franja filtrante para identificar evidencia de erosión, crecimiento de vegetación, compactación, encharcamiento, sedimentación y contaminación (p. ej. aceites).	<ul style="list-style-type: none"> Mensual al inicio y luego semestral.
	Verificar el esparcidor de flujo y la superficie de la franja filtrante para ver si hay gradientes uniformes.	<ul style="list-style-type: none"> Mensual al inicio y luego semestral.
	Inspeccionar el esparcidor de flujo de grava aguas arriba de la franja filtrante para detectar obstrucciones.	<ul style="list-style-type: none"> Mensual al inicio y luego semestral.
	Inspeccionar las tasas de acumulación de sedimentos y establecer las frecuencias de remoción adecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> Mensual al inicio y luego semestral.

Programa de conservación	Acción requerida	Frecuencia típica
Conservación ocasional	Volver a sembrar áreas con crecimiento deficiente de vegetación, alterar los tipos de plantas para que se adapten mejor a las condiciones, si es necesario.	<ul style="list-style-type: none"> Según sea necesario o si el suelo descubierto está expuesto a más del 10% del área de la franja filtrante.
Acciones de remediación	Reparar la erosión u otros daños cambiando el césped o sembrando de nuevo.	<ul style="list-style-type: none"> Según sea necesario.
	Volver a nivelar las superficies irregulares y restablecer los niveles de diseño.	
	Escarificar y pinchar la capa superior del suelo para mejorar el rendimiento de la infiltración, romper los depósitos de limo y evitar la compactación de la superficie del suelo.	
	Eliminar la acumulación de sedimentos en la zanja de grava aguas arriba, el esparcidor de flujo o en la parte superior de la franja filtrante.	
	Eliminar y disponer los residuos de aceite o gasolina utilizando prácticas estándar seguras.	

Fuente: Modificado de Woods-Ballard et al., 2007.

5.1.5 Operación y conservación de drenes filtrantes

Los drenes son elementos de la Infraestructura Verde Vial que requieren de conservación frecuente y que de llenarse de sedimentos o desechos, implican el retiro y recolección del material de relleno.

La Tabla 5.4 proporciona orientación sobre el tipo de requisitos operativos y de conservación que pueden ser apropiados, aunque éstos pueden variar de acuerdo con las características del sitio y los servicios que esté desempeñando el dren.

Tabla 5.4**Requisitos de operación y conservación para los drenes filtrantes.**

Programa de conservación	Acción requerida	Frecuencia típica
Conservación regular	Retirar la basura (incluida la hojarasca) y los desechos de la superficie de drenaje filtrante, las cámaras de acceso y los dispositivos de pretratamiento.	<ul style="list-style-type: none"> • Mensual o según sea necesario.
	Inspeccionar la superficie del drenaje filtrante, las tuberías de entrada/salida y los sistemas de control en busca de bloqueos, obstrucciones, agua estancada y daños estructurales.	<ul style="list-style-type: none"> • Mensual.
	Inspeccionar los sistemas de pretratamiento, las entradas y las tuberías perforadas para detectar acumulación de sedimentos y establecer las frecuencias adecuadas de eliminación de sedimentos.	<ul style="list-style-type: none"> • Semestral.
	Eliminar el sedimento de los dispositivos de pretratamiento.	<ul style="list-style-type: none"> • Semestralmente o según sea necesario.
Conservación ocasional	Quitar o controlar las raíces de los árboles donde se estén invadiendo los lados del drenaje filtrante, utilizando los métodos recomendados (p. ej. NJUG [The National Joint Utilities Group, 2007] o BS3998:2010).	<ul style="list-style-type: none"> • Según sea necesario.
	En lugares con altas cargas de contaminación, retirar el geotextil de la superficie y reemplazarlo, y lavar o reemplazar el medio filtrante superpuesto.	<ul style="list-style-type: none"> • Cada cinco años o según sea necesario.
	Eliminar obstrucciones en las tuberías perforadas.	<ul style="list-style-type: none"> • Según sean necesarios.

Fuente: Modificado de Woods-Ballard *et al.*, 2007.

Si bien los sedimentos acumulados debido a la actividad en la infraestructura vial no se consideran tóxicos o peligrosos, es posible que se requieran pruebas antes de la remoción de sedimentos para determinar su clasificación y métodos de eliminación apropiados. En la mayoría de los casos, será aceptable distribuir el sedimento en el sitio si existe un lugar adecuado, seguro y aceptable para hacerlo. Cualquier daño que se presentara en la vegetación circundante debido a la eliminación de sedimentos o la erosión debe repararse y volverse a sembrar o plantar inmediatamente.

5.1.6 Operación y conservación de estanques y humedales

Los estanques y humedales requerirán de tareas de conservación regulares con la misma frecuencia de las estructuras de la Infraestructura Verde Vial anteriores. Adicionalmente, una vez al año deberán revisarse los conductos de entrada y salida de agua, desagües (si aplica) y eliminar los sedimentos que puedan estar contenidos dentro de los cuerpos de almacenamiento. Este trabajo debe planificarse para que

sea compatible con los requisitos de la vida silvestre que puede usar los estanques y humedales como hábitat y de la temporada de estiaje.

La ventana de tiempo para llevar a cabo tareas de conservación suele ser hacia el final de la temporada de lluvias (entre octubre y noviembre), aunque esto variará según la región. La remoción invasiva de sedimentos y vegetación sólo debe llevarse a cabo en áreas limitadas (25-30% del área del estanque) una vez cada año para minimizar el impacto en la biodiversidad. El manejo de las plantas para lograr los efectos particulares deseados en el hábitat y en el sistema, debe claramente ser especificado en un programa de mantenimiento y conservación previamente diseñado por un especialista y con base en el tipo de vegetación usada, así como el régimen hidrológico y clima de la región.

La vegetación del sitio debe podarse según sea necesario para mantener el estanque libre de hojas y mantener la apariencia estética del sitio. Las áreas de pendientes que se han quedado descubiertas deben volver a vegetarse y las áreas erosionadas deben volver a clasificarse antes de replantar.

Los estanques nuevos pueden rápidamente ser dominados por plantas nativas invasoras. Como no es deseable que todos los estanques nuevos estén dominados por estas plantas, debe asegurarse su control durante los primeros cinco años (Woods-Ballard *et al.*, 2007), mientras se establece la vegetación deseada. Después de este tiempo, generalmente se puede permitir que los estanques se desarrollen naturalmente.

Los planes y programas de conservación deben desarrollarse durante la fase de diseño. Se deben monitorear las necesidades específicas de conservación del estanque y se deben ajustar los programas de conservación para adaptarse a los requisitos establecidos en el diseño.

Tabla 5.5**Requisitos de operación y conservación para estanques y humedales.**

Programa de conservación	Acción requerida	Frecuencia típica
Conservación regular	Remover la basura y escombros.	<ul style="list-style-type: none"> • Mensualmente o según se requiera.
	Cortar el césped.	<ul style="list-style-type: none"> • Mensualmente durante la temporada de crecimiento.
	Cortar la hierba del prado.	<ul style="list-style-type: none"> • Semestralmente en primavera, antes de la temporada de anidación y en otoño.
	Inspeccionar la vegetación marginal y de ribera y eliminar las plantas molestas (durante los primeros 5 años).	<ul style="list-style-type: none"> • Mensualmente al inicio o posteriormente según se requiera.
	Inspeccionar las entradas, salidas, riberas, estructuras, tuberías, etc. en busca de evidencia de bloqueo y/o daño físico.	<ul style="list-style-type: none"> • Mensualmente.

Programa de conservación	Acción requerida	Frecuencia típica
	Inspeccionar el cuerpo del agua en busca de signos de mala calidad del agua.	• Mensualmente (mayo-octubre).
	Inspeccionar las tasas de acumulación de sedimentos en cualquier cámara de carga y en el cuerpo principal del estanque y establecer las frecuencias de remoción adecuadas. Realizar pruebas de contaminación una vez que se haya producido alguna acumulación, para informar las opciones de gestión y eliminación.	• Semestralmente.
	Comprobar los dispositivos mecánicos, por ejemplo, compuertas.	• Semestralmente.
	Cortar a mano plantas acuáticas emergentes y sumergidas (a un mínimo de 0.1 m por encima de la base del estanque; cortar en un máximo del 25% de la superficie del estanque).	• Anualmente.
	Remover el 25% de la vegetación del banco desde el borde del agua hasta un mínimo de 1 m por encima del nivel del agua.	• Anualmente.
	Ordenar todo el crecimiento muerto (limpieza de matorrales) antes del inicio de la temporada de crecimiento.	• Anualmente.
	Remover el sedimento de cualquier cámara de carga.	• Cada 1 a 5 años o según se requiera.
	Eliminar el sedimento y la siembra de un cuadrante del cuerpo principal de los estanques sin que se produzcan sedimentos.	• Cada 5 años o según se requiera.
Conservación ocasional	Remover sedimentos del cuerpo principal de estanques grandes cuando el volumen del estanque o humedal se reduzca en un 20%.	• Con un pretratamiento eficaz, esto sólo será necesario en raras ocasiones, por ejemplo, cada 25 a 50 años.
	Reparar la erosión u otros daños.	• Según se requiera.
	Replantar.	• Según se requiera.
	Airear el estanque cuando se detecten signos de eutrofización.	• Según se requiera.
	Realignar rip-rap (escombros) o reparar otros daños.	• Según se requiera.
	Reparar/rehabilitar entradas, salidas y desbordes.	• Según se requiera.

Fuente: Modificado de Woods-Ballard et al., 2007.

5.1.7 Operación y conservación de cuencas de retención

El principal requisito de conservación de los depósitos de retención o cuencas de infiltración suele ser el corte de la vegetación. Sólo se requiere cortar el césped con regularidad dentro y alrededor de los depósitos de detención a lo largo de las rutas de acceso de conservación, las áreas de servicios (p. ej. senderos), a través de cualquier terraplén y en el área de almacenamiento principal, por lo que su temporalidad dependerá de la disponibilidad de agua. Las áreas restantes se pueden administrar como “praderas”, a menos que se requiera una administración adicional por motivos de paisaje/recreación/o razones estéticas.

Idealmente, la poda debe retener longitudes de pasto de 75 a 150 mm a lo largo de la superficie principal, para ayudar a filtrar contaminantes y retener sedimentos, así como reducir el riesgo de aplanamiento durante eventos de escorrentía.

En la Tabla 5.6 (Woods-Ballard et al., 2007) se proporciona orientación sobre el tipo de requisitos operativos y de conservación que pueden ser apropiados para este tipo de componente de la Infraestructura Verde Vial. La lista de acciones no es exhaustiva y es posible que algunas acciones no siempre sean necesarias, pero el programa de conservación deberá de ser elaborado en la etapa de diseño y preferentemente por un especialista en el tema.

Tabla 5.6
Requisitos de operación y conservación de las cuencas de retención.

Programa de conservación	Acción requerida	Frecuencia típica
Conservación regular	Remover basura y escombros.	• Mensualmente.
	Cortar el césped: para aliviaderos y rutas de acceso.	• Mensualmente (durante la temporada de crecimiento), o según se requiera.
	Cortar el césped: césped de prado en y alrededor de la cuenca.	• Semestral (primavera - antes de la temporada de anidación y otoño).
	Manejar otra vegetación y eliminar plantas molestas.	• Mensualmente (al inicio, después según se requiera).
	Inspeccionar las entradas, salidas y desbordamientos en busca de bloqueos y limpiarlos si es necesario.	• Mensualmente.
	Inspeccionar riberas, estructuras, tuberías, etc. en busca de evidencia de daño físico.	• Mensualmente.
	Inspeccionar las entradas y la superficie de la instalación en busca de acumulación de sedimentos. Establecer frecuencias apropiadas de remoción de sedimentos.	• Mensualmente (durante el primer año), luego anualmente o según se requiera.
	Monitorear las compuertas y otros dispositivos mecánicos.	• Anualmente.

Programa de conservación	Acción requerida	Frecuencia típica
	Limpiar la vegetación muerta antes del inicio de la temporada de crecimiento.	• Anualmente.
	Eliminar el sedimento de las entradas, la salida y el compartimento de carga.	• Anualmente (o según se requiera).
	Manejar las plantas de los humedales en la piscina de salida, donde esté previsto.	• Anualmente.
Conservación ocasional	Siembra de áreas de escaso crecimiento de vegetación.	• Según se requiera.
	Podar, recortar los árboles y eliminar los esquejes.	• Cada 2 años, o según se requiera.
	Eliminar los sedimentos de las entradas, salidas, compartimento de carga y depósito principal cuando sea necesario.	• Cada 5 años, o según se requiera (es probable que sean requisitos mínimos cuando se proporciona un control de fuente ascendente efectivo).
Acciones de remediación	Reparar la erosión u otros daños volviendo a sembrar o cambiar el césped.	• Según se requiera.
	Realineación de <i>rip-rap</i> (escombros).	• Según se requiera.
	Reparación/rehabilitación de entradas, salidas y desbordes.	• Según se requiera.
	Volver a nivelar las superficies irregulares y restablecer los niveles de diseño.	• Según se requiera.

Fuente: Modificado de Woods-Ballard et al., 2007.

5.1.8 Operación y conservación de pozos de infiltración

Al tratarse de infraestructuras complejas, los pozos de infiltración implican una revisión técnica más especializada cada año durante el periodo de sequía, con el objetivo de mantener y garantizar el buen funcionamiento de todo el sistema. El objetivo de esta revisión técnica es verificar el correcto funcionamiento y las afectaciones posibles en la calidad del agua. Sin embargo, de forma general, si los pozos están bien diseñados y se construyen correctamente, el o los pozos filtrantes operarán sin problemas y necesitarán de tareas de conservación mínimas. Por lo tanto, las labores de conservación se concentran en la medición de niveles y verificar si las paredes de los pozos se encuentran en buen estado.

Para el caso de acciones de remediación o conservación correctivo, éstas serán dictadas en consecuencia de la revisión técnica especializada al observar:

- Disminución de caudal de infiltración.
- Aumento del nivel promedio en los mantenimientos ocasionales.
- Flujo de arena o movimiento de los sedimentos al interior del pozo.

- Cambio de color, mal olor o enturbiamiento del agua.
- Cambio en la calidad del agua (observado en el proceso de monitoreo).
- Contaminación.

De acuerdo con el problema observado y el diagnóstico se podrá tomar la decisión económica-técnica más viable, que va desde la limpieza y desazolve del pozo, hasta su clausura.

Tabla 5.7
Requisitos de operación y conservación de los pozos de infiltración.

Programa de conservación	Acción requerida	Frecuencia típica
Conservación regular	Remover basura y escombros cerca de la boca del pozo.	• Semanal o mensualmente según sea el grado de contaminación del sitio.
Conservación ocasional	Monitoreo del nivel en el pozo de infiltración y pozos de observación.	• Mensualmente o de acuerdo con la temporada de lluvias (un monitoreo al finalizar la época de lluvias y otra al finalizar).
	Inspección visual de las paredes del pozo.	• Mensualmente o de acuerdo con la temporada de lluvias.
	Revisión técnica especializada.	• Anualmente.
Conservación de remediación	Reparación de ademes.	• Según se requiera.
	Cementaciones intermedias o tapones de fondo.	• Según se requiera.
	Lavado y cepillado de ademes.	• Según se requiera.
	Remoción de sólidos.	• Según se requiera.

Fuente: Modificado de Woods-Ballard et al., 2007.

5.2 Operación y conservación de los componentes de la Infraestructura Verde Vial en materia de servicios ambientales

5.2.1 Operación y conservación de componentes para la reducción de gases de efecto invernadero (energías renovables)

La energía producida por un aerogenerador o un sistema fotovoltaico es determinada por su eficiencia, la cual reflejará las condiciones en las cuales se encuentra operando el sistema. Los estudios del lugar de ubicación del sistema fotovoltaico o eólico y sus cálculos económicos no son los únicos parámetros que permiten medir la rentabilidad y ganancia de la inversión realizada, además, se debe tener en cuenta el desgaste de las máquinas y equipos, sobre todo en el caso de los aerogeneradores, ya que los costos inesperados son relativamente altos.

Para mitigar esta problemática se debe diseñar un programa de operación y conservación que conlleve a mantener o aumentar la eficiencia y eficacia de los sistemas de generación de energía renovable.

La ingeniería de operaciones tiene como principales funciones las que se presentan en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8
Principales funciones en la ingeniería de operaciones para sistemas de energía renovable.

Funciones principales de la ingeniería de operaciones		
	Sector eólico	Sector solar
Asegurar un eficiente sistema remoto de monitoreo.	X	X
Detección continua de mensajes de fallo.	X	X
Eliminación oportuna de fallas.	X	
Las inspecciones regulares del aerogenerador para detección temprana de fallas (mínimo 2 veces al año).	X	
Las inspecciones regulares del inversor para detección temprana de fallas (mínimo 4 veces al año).	X	X
Planificación optimizada de conservación y reparaciones.	X	X
Seguimiento de los servicios proporcionados por las empresas suministradoras de las turbinas, paneles solares y terceros.	X	X
Adquisición de datos detallada de la producción y libros de registro completos.	X	X
Búsqueda de puntos calientes para detección temprana de fallas (mínimo 1 vez al año).		X

5.2.1.1 Recomendaciones para la operación de los sistemas de energía renovable

La clave del éxito que lleva a la óptima operación de los sistemas de generación con energías renovables es consecuencia principalmente de las siguientes situaciones:

- Acciones en remoto y comunicación oportuna con el personal *in situ*.
- Equipo *in situ*: gran experiencia y capacitación constante.
- Soporte local y remoto de la ingeniería, aplicando las mejoras tecnológicas.
- Alta tecnología de los aerogeneradores.
- Análisis de las incidencias.

- Análisis de las causas raíz de las pérdidas de generación.
- Análisis de las disponibilidades y prestaciones de cada máquina.

5.2.1.2 Recomendaciones para la conservación de los sistemas de energía renovable

Se entiende como conservación y/o mantenimiento al conjunto de acciones que tienen como objetivo principal preservar un equipo o restaurarlo para que pueda llevar a cabo la función requerida.

La conservación de la infraestructura solar fotovoltaica se caracteriza por una mayor sencillez, en gran medida al no contar con partes móviles suele ser más económica y de menor riesgo.

La conservación de la infraestructura eólica se caracteriza por su complejidad debido a la intervención de un gran número de variables, algunas de ellas difíciles de predecir, y de alto costo y riesgo.

La conservación en ambos casos requiere de una planificación y un control cuidadoso para:

- Una adecuada planificación y optimización en la gestión de los recursos utilizados.
- Contar con recursos altamente especializados, bien entrenados y equipados.
- Sincronizar los diferentes recursos involucrados en la operación.
- Organizar e implementar procedimientos de trabajo seguros.
- Investigar y desarrollar de forma continua herramientas de gestión integral.
- Investigar y desarrollar de forma continua nuevas técnicas y herramientas para la realización de los trabajos, adaptándolas a las condiciones de trabajo.

Las actividades de conservación preventivas son el elemento central de los servicios de conservación de un sistema de generación con energía renovable. Esto incluye inspecciones visuales y físicas periódicas, así como actividades de verificación realizadas con frecuencias específicas de todos los componentes clave que son necesarios para cumplir con los manuales operativos y las recomendaciones emitidas por los fabricantes originales de los equipos. Estas actividades dependen de cada componente del sistema y se listan a continuación.

5.2.1.3 Conservación de los sistemas de energía eólica

Sistema eléctrico: realizar la limpieza de los distintos componentes y accesorios eléctricos, así como distintas pruebas para asegurar el funcionamiento del sistema eléctrico. Entre las pruebas más comunes se encuentran pruebas de aislamiento, pruebas a dispositivos de protección, pruebas de conexión a tierra y pruebas funcionales. Los componentes tales como los fusibles serán sustituidos en caso de producirse alguna sobreintensidad. Este sistema cuenta con sistemas de protección de circuitos eléctricos (fusibles, magnetotérmicos, etc.).

Electrónica de control: se debe identificar el funcionamiento de los equipos y elementos electrónicos realizando pruebas de funcionamiento. Además, se sustituirán los componentes electrónicos una vez sean dañados.

Sensores: al igual que en la electrónica de control, se realizan pruebas de funcionamiento, asegurando de esta manera el correcto funcionamiento de cada sensor. En el caso de que algún sensor no funcione de forma correcta se sustituirá por otro.

Sistema hidráulico: se inspeccionarán los cilindros hidráulicos, así como el tanque en donde se almacena el fluido.

Sistema de orientación: se tiene que inspeccionar tanto el propio mecanismo de orientación como el contador de la torsión de los cables, cuya función es medir la torsión de los cables eléctricos para evitar que la torsión supere el límite, produciendo daños en los mismos. En el caso de que se supere la torsión, los cables deben de volver a ser colocados de la forma correcta. En el caso de que los cables presenten fisuras por su torsión, se reemplazarán con cables nuevos.

Palas: se realiza la limpieza de las palas, así como el pintado para que se ajuste a la normativa.

Buje: se realiza la limpieza del buje para evitar cualquier tipo de fuerza de rozamiento que pueda dificultar la rotación del rotor.

Freno mecánico: se realizan pruebas de funcionamiento, por ejemplo, frenando el rotor cuando está en pleno funcionamiento.

Generador: realizar la limpieza externa e interna del equipo (de forma mensual), pruebas de funcionamiento (mensual), revisión de los componentes como son escobillas, conexiones, lubricación, entrehierros, devanados (trimestral) y comprobación del equilibrio del rotor (anual).

Multiplicadora: realizar la limpieza de los engranajes, así como la sustitución de los engranajes en el caso de que fuera necesario.

Estructura de la góndola: revisión del aspecto de la góndola (señales de oxidación) y la limpieza (tanto interna como externa).

Tren de potencia: limpieza profunda y sustitución de los componentes del tren de potencia.

Periodicidad: de acuerdo con la periodicidad de su realización, las actividades de conservación se clasifican en:

- Actividades rutinarias que se realizan diariamente y son llevadas a cabo por el equipo de operación. Este tipo de actividades consisten en actividades básicas que se realizan de forma sistemática.
- Actividades programadas que se realizan a lo largo del año, las cuales son más específicas que las actividades rutinarias y no necesitan ser realizadas diariamente.
- Actividades que se realizan durante paradas planeadas: este tipo de actividades son acciones que no se pueden realizar con la instalación en pleno funcionamiento, por lo que es necesario realizar las paradas de ciertos equipos.

Respecto a la periodicidad de otras actividades de conservación, se mencionan las siguientes a modo de ejemplo, sin embargo, es necesario que el especialista que diseñe los sistemas de energía eólica determine las actividades de operación y conservación, así como su periodicidad.

- Verificación del generador: cada año.
- Cambio de aceite del multiplicador: cada 18 meses.
- Cambio de aceite del equipo hidráulico: cada 5 años.
- Reapriete y control de pernos: después de 3 meses.
- Menor: comprobación de los pares de apriete, lubricación.
- Mayor: revisión exhaustiva del aerogenerador.

En la conservación de la infraestructura eólica está claro que la disponibilidad de piezas de recambio no puede dejarse a la ligera, ya que existen muchas piezas móviles que requieren monitoreo constante.

La gestión de partes de repuesto es una parte inherente y sustancial de la conservación, cuyo objetivo es asegurar que dichos componentes estén disponibles de manera oportuna para el mantenimiento correctivo.

Se recomienda considerar la falta de selectividad de las protecciones y que la insuficiente coordinación entre los diferentes niveles de protección (aerogenerador, interruptor de derivación e interruptor general primario) produce una parada muy superior a la estrictamente necesaria.

5.2.1.4 Conservación de los sistemas de energía solar

Soportes: verificación de la verticalidad de sus elementos. Búsqueda de roturas o esfuerzos en los elementos estructurales. Revisión del torque y de sus elementos de unión.

Paneles solares: se debe identificar el buen funcionamiento del equipo. Realizar pruebas de funcionamiento. Limpieza periódica. Identificación de puntos calientes. Identificación de roturas. Revisar la caja de conexiones.

Conectores: búsqueda de puntos calientes, Verificar la integridad del conductor y del aislamiento, detección de conexiones sueltas, comprobar el par de apriete de los pernos del terminal.

Regulador de carga: revisión de fallas a través de un software específico y revisión del estado de los conectores.

Inversores: revisión del sistema de refrigeración, limpieza de filtros, revisión de fallas a través de un *software* específico, revisión del torque y de sus elementos principales y revisión del estado de los contactores.

Electrónica de control: se debe identificar el buen funcionamiento de los equipos y elementos electrónicos realizando pruebas de funcionamiento.

Baterías: mantener limpias y ajustadas las terminales, revisión del nivel y estado del electrolito, comprobar el buen funcionamiento de la batería y control de la temperatura de la estancia de las baterías.

Periodicidad: respecto a la periodicidad de otras actividades de conservación, se mencionan las siguientes a modo de ejemplo, sin embargo, es necesario que el especialista que diseñe el sistema solar determine las actividades de operación y conservación, así como su periodicidad.

- Limpieza y revisión visual de paneles y baterías: cada mes.
- Poda de árboles cercanos y verificación de puntos calientes: cada 3 meses.
- Comprobar los geles aislantes de la caja de conexiones, comprobar las fugas eléctricas a tierra y buen funcionamiento del inversor: cada 6 meses.
- Revisión de la potencia instalada, detección de módulos dañados y verificación del estado de las conexiones.
- Comprobación de las características eléctricas del generador (Voc, Isc, Vmax e Imax en operación) y revisión de los anclajes sobre la estructura de apoyo: cada año.

5.2.1.5 Mantenimiento de la subestación

Transformador de potencia: de manera periódica se debe realizar el análisis del aislamiento del transformador. Además, debe controlarse el estado del aceite cambiándolo cada cierto tiempo, monitorear posibles fallos en el transformador y realizar limpiezas internas y externas del mismo. En el caso de que se produzca algún fallo, se reemplazarán los componentes tales como las bobinas o empaques.

Equipo rectificador: comprobar su correcto funcionamiento y si no es el caso, sustituir los componentes defectuosos.

Sistema de tierra: se mide periódicamente la tierra, comprobando que tenga el valor correcto.

5.2.1.6 Mantenimiento de otros equipos auxiliares

Pórticos y estructuras: revisión de las estructuras.

Sistema de alumbrado: reposición de luminaria y/o bombillos en caso de que se produzca algún defecto.

Valla o cerco delimitador: se revisa que la valla está completa y no tenga “huecos” que permitan el acceso al terreno.

Equipos de maniobra y medición: estos equipos son revisados antes y después de su uso para asegurar el correcto funcionamiento.

Equipos de protección: los equipos de protección tales como los interruptores automáticos son revisados periódicamente mientras que los elementos de bajo presupuesto y fácilmente sustituibles tales como los fusibles, se cambian cuando es necesario.

5.2.2 Operación y conservación de componentes para la reducción de ruido

5.2.2.1 Barreras acústicas

Por lo general, las pantallas de aislamiento de ruido no requieren de mucho mantenimiento una vez instaladas y dependiendo de los materiales utilizados en su construcción éstas serán resistentes o no a la corrosión, tendrán una alta durabilidad y resistencia a la humedad, por lo que requerirán de sencillas reparaciones o reposiciones en caso de vandalismo.

5.2.3 Operación y conservación de componentes para la conectividad ecológica

5.2.3.1 Pasos para fauna

Todas las medidas de mitigación ambiental, como son los pasos para fauna que se hayan implementado en la infraestructura vial deben ser inspeccionados y conservarse de forma rutinaria para garantizar su funcionalidad a largo plazo. Por tales motivos, el costo de la conservación debe ser considerado desde la etapa de planeación de la obra y deberá ser definido el tipo y la frecuencia de los procedimientos de conservación por aplicar, así como la organización en tiempos y asignación de responsables para ello.

Dado el carácter dinámico de los ecosistemas, es importante involucrar a especialistas biólogos, ecólogos y expertos en fauna y vegetación. Esta estrategia interdisciplinaria ha facilitado en otros países el correcto funcionamiento tanto del monitoreo de estos pasos como de su conservación.

La conservación de los pasos para fauna, así como el monitoreo de su efectividad, están estrechamente vinculados. Los procedimientos de seguimiento se diseñan principalmente para comprobar si el paso implementado cumple su propósito, pero al mismo tiempo permite identificar déficits y necesidades de conservación y mejora para maximizar el uso de los pasos por parte de los animales. En el *Manual de diseño de pasos para fauna silvestre* de la SCT, 2020, se presentan a detalle las estrategias para su operación y conservación.

5.3 Operación y conservación de componentes para otras alternativas de componentes de la Infraestructura Verde Vial

5.3.1 Pavimentos permeables

Para pavimentos que serán expuestos al tráfico en sus condiciones de servicio, generalmente se recomienda que el pavimento no se abra a la construcción o al tráfico público por 7 días y se recomienda un curado continuo hasta que el pavimento se pueda abrir al tráfico.

I. INSPECCIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN Y ENSAYOS.

Las prácticas de inspección normalmente utilizadas durante la construcción y que tienen como base de aceptación una prueba de revenimiento o resistencias de cilindros no son relevantes para el concreto permeable. La resistencia es función del grado de compactación y la compactación del concreto permeable es difícil de reproducir en cilindros. En su lugar, la prueba de masa unitaria es usualmente utilizada para propósitos de aseguramiento de calidad, con valores aceptables que dependen del diseño de mezcla, pero generalmente entre 1600 kg/m³ y 2000 kg/m³ (100 lb/ft³ y 125 lb/ft³). El método de ensayo ASTM C29 es generalmente preferido en lugar de ASTM C138 dada la consistencia del concreto permeable. No obstante, ASTM C138 se usa en algunos casos. Se recomiendan frecuencias de prueba diarias (una por día), o cuando la inspección visual indica cambios en el aspecto de la mezcla.

II. INSPECCIÓN DESPUÉS DE LA CONSTRUCCIÓN Y ENSAYOS.

Una vez transcurrido un periodo de 7 días, el muestreo de especímenes núcleos del pavimento se puede llevar a cabo siguiendo la práctica ASTM C42. Una frecuencia típica de muestreo y ensayo es de 3 corazones por cada 75 m³ (100 yd³). El ensayo a compresión para la resistencia no es recomendado dada la dependencia de la resistencia a compresión en la compactación. La masa unitaria determinada de acuerdo con el método ASTM C140 provee una medida de aceptación. Requerimientos típicos especifican que el promedio de masas unitarias se encuentre dentro de los 80 kg/m³ (5 lb/ft³) del valor de diseño. El criterio de aceptación común para el espesor del pavimento es que no debe haber ningún espécimen núcleo por debajo del espesor de diseño por más de 13 mm (1/2 in). Debe hacerse notar que los pavimentos de concreto permeable pueden tener una mayor variabilidad en el espesor de la sección del pavimento cuando se colocan en una subrasante de granulometría abierta comparado con pavimentos de concreto convencional.

III. CONSERVACIÓN.

La mayoría de los pavimentos de concreto permeable funcionan bien con poco o ningún mantenimiento. La conservación de un pavimento de concreto permeable consiste primordialmente en la prevención del bloqueo o de taponamientos de la estructura de huecos. Materiales de jardinería tales como arena, corteza de árbol, suelo y tierra de cultivo no debe de ser cargado en el concreto permeable, ni siquiera temporalmente. El aspirado puede ser necesario anualmente o con mayor frecuencia para remover basura de la superficie del pavimento. Otras opciones de limpieza pueden incluir sopladoras de motor y lavado a presión. En algunos casos de pavimentos de concreto permeable bloqueados o con taponamientos se ha documentado que el lavado a presión ha logrado restaurar del 80% al 90% de su permeabilidad (MCIA, 2002).

La siguiente Tabla muestra las actividades de conservación típicas para superficies de concreto permeable.

Tabla 5.9

Actividades de conservación típicas para superficies de concreto permeable.

Actividad	Frecuencia
Asegurarse de que el área pavimentada está libre de escombros y basura.	Cada mes
Asegurarse de que el área está libre de sedimento.	Cada vez que sea necesario
Pasar una barredora/aspiradora para mantener la superficie libre de sedimento.	Cada vez que sea necesario
Inspeccionar la superficie para revisar deterioro y posibles lascas o astillas.	Cada año

5.3.2 Tecnosuelos

Los tecnosuelos o suelos artificiales pueden ser utilizados como material que rellene o integre las terrazas, cunetas, pozos de infiltración u otras obras dentro de la infraestructura vial. Considerando el propósito para el cual serán utilizados los tecnosuelos, el procedimiento operativo es el siguiente:

a) Selección de los materiales.

De acuerdo con las actividades de la obra, se seleccionarán los materiales de mayor volumen de generación, se sugiere utilizar materiales de diferente naturaleza para garantizar el aporte de diferentes propiedades físico-químicas al suelo.

En algunos casos se conoce o identifica que los residuos contienen elementos contaminantes, tales como plomo, cobre, zinc, cadmio, cobalto. En este caso, ese material se utiliza en menor proporción para realizar una dilución del contaminante. También es posible utilizar una mayor proporción de estos residuos al ser mezclados con otros materiales, de tal manera que el pH de la mezcla esté en el valor de pH en donde el elemento contaminante no esté disponible o no se libere al agua. En pH ácidos (pH menor a 5.5) la mayoría de los metales son disponibles para las plantas o se movilizan al agua, a medida que el pH es mayor a 7 los metales están menos disponibles, excepto el selenio, el vanadio, el cromo y el arsénico. Zonas vegetadas con plantas hiperacumuladoras son una alternativa de manejo de residuos con presencias de metales pesados.

En el caso de que los residuos tengan tamaños muy grandes, es necesario triturarlos a tamaños entre 1 y 2 cm de diámetro. Estos tamaños permiten generar mezclas más manipulables para fines de construcción de suelos artificiales, ya que permiten mayor interacción química y retención de humedad. Tamaños grandes son necesarios para materiales drenantes y los materiales finos para suelos que almacenen el suelo.

Puede ser requerida la disponibilidad de máquinas trituradoras estacionarias, cribas que ayuden a separar el material y maquinaria que permita el transporte (Figura 5.1).

Figura 5.1**Maquinaria necesaria para la construcción de suelos artificiales.**

Fuente: Tomado de <https://www.interveira.com/2019/05/28/somos-especialistas-en-maquinaria-de-tratamiento-de-aridos-y-mineria/>

Asimismo, se requiere de un espacio para la preparación de las mezclas, considerando los volúmenes a mezclar. En este caso, se sugiere preparar en el sitio en donde se van a distribuir los suelos y en donde será necesario trasladar el material para las mezclas.

b) Construcción de las mezclas y revegetación.

La fase final de la construcción de los suelos artificiales consiste en llevar a cabo las mezclas con las proporciones diseñadas, de acuerdo con cada propósito requerido en el proyecto y, finalmente, la forestación o vegetación.

En el caso de revegetación es necesario considerar las condiciones climáticas de cada sitio y a partir de ésta seleccionar especies locales y con mayor resistencia a concentraciones de sales, ya que estos materiales inicialmente liberan muchas sales, principalmente los que se construyen a partir de cascajo. En climas con disponibilidad de agua, estos suelos van a favorecer el acondicionamiento rápido de las plantas. Las actividades para la construcción de tecnosuelos o suelos artificiales se resumen en la siguiente Tabla.

Tabla 5.10**Requisitos de operación para la construcción de tecnosuelos.**

Actividad	Frecuencia	Comentarios
Separación de material inorgánico para el reúso.	Al inicio de la obra, cuando se planea la excavación de diferentes áreas.	<ul style="list-style-type: none"> Los residuos de excavación de tierra o sedimento deben separarse para uso en la restauración de los suelos modificados.
Triturado de los materiales inorgánicos.	Al final de la obra, cuando se estime cuáles son los residuos que genera la obra.	<ul style="list-style-type: none"> Residuos de excavación, cascajo, ladrillo y tepetate deben reducirse en tamaño mediante triturado para generar material que permita la elaboración del suelo artificial, éste representa el esqueleto del suelo que da lugar a la permeabilidad y aporte de nutrientes a las plantas.
Preparación de material orgánico.	Al inicio de la obra, cuando se descubre el derecho de vía y se desmota la vegetación.	<ul style="list-style-type: none"> Los residuos de vegetación pueden compostarse para utilizarlos en el aporte de materia orgánica a los suelos.
Triturado de los materiales orgánicos.	Al inicio de la obra, cuando se descubre el derecho de vía y se desmonta la vegetación.	<ul style="list-style-type: none"> Los residuos de troncos y maderables se deben triturar para uso como <i>mulch</i> en diferentes infraestructuras verdes o como material que favorece la retención de agua en los suelos artificiales.
Elaboración de mezcla.	Al final de la obra, cuando se requiere restaurar zonas alteradas, desnudas o hacer instalación de Infraestructura Verde Vial.	<ul style="list-style-type: none"> De acuerdo con los requerimientos se preparan mezclas que integren máximo 30% de material orgánico y el resto en residuos orgánicos de diferentes tamaños de acuerdo con las funciones requeridas en cada sitio. Mezcla el material con uso de la maquinaria.
Vegetación.	Al final de la obra.	<ul style="list-style-type: none"> Vegetar los suelos de acuerdo con las condiciones del clima y al menos en la etapa inicial realizar un riego para asegurar el establecimiento de las plantas o realizar la vegetación durante la época de lluvias.
Revegetación/ reforestación.	Revisar 2 veces por año.	<ul style="list-style-type: none"> Monitoreo de la sobrevivencia de las especies utilizadas en las áreas habilitadas, y si no se da una buena adaptación de éstas, cambiar la especie.
Monitoreo de las propiedades químicas del suelo.	Realizar 1 vez por año.	<ul style="list-style-type: none"> Durante los dos primeros años realizar un monitoreo de las variables del suelo, tales como pH, conductividad eléctrica y contenido de materia orgánica.

5.3.3 *Sistemas inteligentes de transporte (conducción eficiente o ecodriving)*

Implementar este tipo de sistemas inteligentes de transporte requiere de la generación e implementación de políticas públicas y campañas de conducción consciente, además del monitoreo constante de las aplicaciones y servicios informáticos y tecnológicos que desarrollan estos sistemas.

Para que el *ecodriving* sea adecuadamente ejecutado el conductor debe tener conocimientos sobre conducción eficiente, por lo cual una de las medidas de operación de estos sistemas será fomentar y promover educación sobre este tema. Asimismo, será necesario mantener la infraestructura vial en buenas condiciones, y será muy favorable la implementación de políticas públicas para impulsar el uso de combustible y tecnologías más amigables con el ambiente.

5.3.4 *Bajo puentes*

Este tipo de componentes de la Infraestructura Verde Vial requieren de adecuadas tareas de conservación, cuya periodicidad dependerá de las características y uso de cada espacio. En este sentido, es importante la coordinación de las entidades administrativas encargadas de este elemento. La experiencia dicta que cuando no existe un documento que establezca rutinas de conservación y limpieza, o donde se registren las horas que acude el personal de servicio asignado por parte de la alcaldía nacional correspondiente, estos espacios tienden a la degradación.

Es importante que la comunidad esté involucrada y que desarrolle un sentido de pertenencia al espacio, de esta manera contribuirá con su cuidado y protección, por lo que también es relevante que pueda estar informada de cómo y dónde puede realizar reportes en casos de daños, usos inadecuados del espacio, entre otros problemas. Mientras mayor sea el uso que la comunidad pueda darle a los bajo puentes, más se involucrará con su conservación.

CAPÍTULO 6 METODOLOGÍA DE MONITOREO DE LOS COMPONENTES DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE VIAL

El monitoreo es un proceso sistemático de evaluación de cambios en cualquier sistema como respuesta a una nueva actividad. Para identificar los cambios en el funcionamiento de los sistemas se requiere del uso de variables indicadores de respuesta. Por lo tanto, es necesario dar seguimiento a los componentes de la Infraestructura Verde Vial y a los efectos que éstos producen en su entorno, evaluando su funcionamiento en función de las variables indicadoras.

El monitoreo de las estructuras que componen la Infraestructura Verde Vial debe permitir identificar los efectos de los diseños, de las técnicas constructivas y de las actividades operativas y de conservación, en los sistemas ambientales modificados por la implementación de la Infraestructura Verde Vial.

En este sentido, gracias al monitoreo de la Infraestructura Verde Vial se puede evaluar el funcionamiento de ésta y detectar fallas o desviaciones en el funcionamiento de sus componentes, lo cual permitirá realizar acciones correctivas o de reparación, y por lo tanto, asegurar que ésta brinde los servicios ecosistémicos y ambientales planteados en su diseño.

Como se ha visto en apartados anteriores, muchos de los componentes de la Infraestructura Verde Vial son multifuncionales y brindan más de un beneficio. Es por ello que para dar un mejor seguimiento y evaluación de los servicios ecosistémicos y ambientales brindados, en este apartado se divide el monitoreo en función del factor ambiental que se requiere evaluar en específico. En este sentido, se presentarán recomendaciones de monitoreo para evaluar la eficiencia de los componentes de la Infraestructura Verde Vial de acuerdo con los beneficios que brindan en materia de vegetación, suelo, agua y servicios ambientales.

6.1 **Monitoreo de los componentes de la Infraestructura Verde Vial en materia de vegetación**

La vegetación es un elemento incluido en gran parte de los componentes de la Infraestructura Verde Vial y que sirve de elemento de evaluación del funcionamiento de éstos. También es un indicador de la calidad del suelo, ya que responde a la disponibilidad de nutrientes y a condiciones fisicoquímicas favorables.

Para el monitoreo de la vegetación se deberán establecer acciones que permitan evaluar el funcionamiento de los componentes de la Infraestructura Verde Vial, a partir de indicadores que determinen su calidad, así como acciones de conservación de suelo. Esta actividad se realizará de forma general para todas las especies plantadas o reubicadas. Se recomienda que el monitoreo se inicie al segundo mes de haber instalado a los ejemplares vegetales, aunque dependiendo de las necesidades y especificaciones de la vegetación implantada (determinada por el especialista que diseñe estos componentes) deberá de elaborarse un plan de monitoreo específico para la vegetación de la Infraestructura Verde Vial.

Posterior a la revegetación, el periodo de monitoreo recomendado será de cada 6 meses hasta completar un lapso de 5 años, en el cual se espera lograr el establecimiento total de los ejemplares con un mínimo de sobrevivencia del 80 %.

El personal capacitado para esta actividad determinará si se requiere ajustar la duración o la periodicidad del monitoreo. Las actividades se realizarán de manera programada, y con base al resultado del monitoreo se determinará la necesidad de reponer ejemplares.

- I. Información por registrar en el monitoreo y actividades a realizar.
 - Tasa de mortalidad.
 - Tasa de sobrevivencia.
 - Coloración.
 - Estado fenológico (fructificación, floración, etapa de desarrollo vegetativo y de letargo).
 - Desarrollo de raíces en individuos (muestreo al azar, por lo menos 5 individuos de 50).
 - Depredación.
 - Daños y causas (ramoneo, enfermedad, radiación solar, etc.).
 - Mantenimiento de zanjas, tinajas, cajetes, tutores y otros elementos.
 - Mantenimiento de acciones de conservación de suelos.
 - Aumento en la materia orgánica, carbono orgánico, actividad biológica, estabilidad de agregados o retención de humedad en el suelo.

Para evaluar el éxito de la vegetación de los sitios dentro de la Infraestructura Verde Vial se aplicarán los criterios expresados en la siguiente Tabla:

Tabla 6.1
Método de evaluación de la vegetación en la Infraestructura Verde Vial.

Superficie vegetada
(Número de especies plantadas/número de especies protegidas) *100
(ha con aplicación/ha autorizadas) *100
Reporte de evaluación inicial
(No. de individuos plantados/no. de individuos sobrevivientes) *100
(No. trípticos distribuidos/total de personal en la obra) *100
Monitoreo y conservación de obras de conservación de suelo
Porcentaje de suelo desnudo en el área de vegetación
Porcentaje de retención de agua en el suelo

Se recomienda llevar registro mediante informes de cada monitoreo y de manera semestral, para evidenciar y poder analizar los avances de la implementación de la flora silvestre, mismos que deberán de ir acompañados de evidencia fotográfica.

- II. Medidas correctivas en caso del desvío del funcionamiento (en materia de vegetación).

En un escenario donde la supervivencia de los individuos plantados descienda del 80%, se ejecutarán medidas correctivas de inmediato.

En caso de presentarse plagas o enfermedades, se deberá ejecutar un tratamiento en los organismos mediante el empleo de sustancias orgánicas como fungicidas, repelentes, antibióticos y/o insecticidas. Es importante recalcar que las sustancias utilizadas deberán ser orgánicas y sólo deberán ser usadas como un método ocasional de cuidado. En caso de que sea toda una zona la afectada, se evaluará la posibilidad de retirar y disponer todos los organismos enfermos que constituyan un foco de infección, siendo éste el último recurso.

Cuando se presenten afectaciones causadas por fauna silvestre o feral de forma reiterada, se realizarán acciones de protección, cercado, recubrimiento e incluso aislamiento de los individuos afectados, mediante piedras, ramas u otras técnicas rústicas y sencillas que ofrezcan una barrera accesible, temporal y versátil.

Cuando se observe la pérdida de vigorosidad por razones de cepellonado incorrecto o factores climáticos adversos, una vez corregido el cepellón, se podrá plantear el traslado de los organismos a otra zona menos vulnerable, o bien, en casos urgentes, se podrán resguardar los organismos afectados dentro de un vivero hasta que alcancen un estado fitosanitario suficiente para su adecuada plantación.

Si se presenta el caso de extracción de individuos por parte de personas ajenas al proyecto o elementos de los frentes de trabajo, se realizará la denuncia ante las autoridades competentes, al mismo tiempo que se colocarán letreros preventivos y se

procurará la vigilancia programada. Reforzar la concientización en las comunidades locales permitirá reducir el vandalismo en áreas vegetadas.

Se realizarán actividades de reposición de pérdidas y una vez estabilizada y mantenida la supervivencia en un mínimo de 80%, la periodicidad de los monitoreos será más espaciada, siendo mensual durante el primer año y bimestral en años subsecuentes. Para maximizar las probabilidades de supervivencia de los organismos trasplantados, es de capital importancia llevar a cabo con la periodicidad requerida las tareas de mantenimiento antes mencionadas, de modo que se provea de las mejores condiciones posibles a los organismos.

Para mayor detalle sobre los aspectos a considerar para dar seguimiento a la vegetación de la Infraestructura Verde Vial, se recomienda consultar el *Manual de revegetación y reforestación en la infraestructura carretera*, elaborado por la Dirección General de Servicios Técnicos de la SICT (2021). En él podrán encontrar especificaciones y lineamientos detallados a seguir desde la etapa de planeación hasta el monitoreo y evaluación de los componentes de vegetación de la Infraestructura Verde Vial.

6.2 Monitoreo de los componentes de la Infraestructura Verde Vial en materia de suelo

La Infraestructura Verde Vial se plantea como un conjunto de componentes y prácticas propuestas para tener sistemas de transporte sostenibles en el tiempo. En el caso del manejo y conservación del suelo, él o los diseños de las estructuras de la Infraestructura Verde Vial están direccionados principalmente al control de la erosión y regulación de escurrimientos superficiales, ya que estos dos procesos se consideran los de mayor impacto en los proyectos de infraestructura vial. Son bien conocidos los procesos de degradación química como la contaminación y la degradación física, como el sellamiento y la compactación del suelo. En este sentido, gran parte de las estructuras propuestas serán instaladas para regular la contaminación y compactación del suelo, entre otros servicios ecosistémicos, y es con énfasis en vigilar esos procesos de deterioro de los suelos que se realiza el monitoreo de los componentes de la Infraestructura Verde Vial.

6.2.1 Monitoreo de la erosión

El monitoreo de la eficiencia de los componentes de la Infraestructura Verde Vial para el control de la erosión del suelo se puede llevar a cabo en parcelas experimentales y en pendientes de montaña, o bien, mediante el modelamiento de la erosión de pequeñas cuencas a la misma escala de análisis. El control de la erosión se puede llevar a cabo utilizando métodos directos, a través de medición de volumen de sedimentos utilizando trampas de sedimentos, sin embargo, esta ruta es muy costosa y demanda muchos recursos. Por esta razón, el uso de modelos físicos ha sido más comúnmente usado, ya que permite el uso de parámetros que pueden ser obtenidos a partir de bases disponibles como modelos digitales de elevación, clima, y cobertura vegetal.

Los modelos que permiten hacer el monitoreo de la erosión del suelo son:

- RUSLE 3D: enfoque empírico de factores de erosión, con una función modificada del factor LS (Mitas y Mitasova, 1998; Renard, *et al.*, 1997; Wischmeier y Smith, 1987).
- THORNES: ecuación de erosión geomórfica (Thornes, 1985).
- Ley de fuerza del flujo (stream power law): basado en el MED (Barnes y Pelletier, 2001).
- MORGAN: enfoque del modelo de Morgan (Morgan, 1995; Morgan *et al.*, 1998), con una implementación espacial usando rutinas de SIG en la acumulación de flujo: SEMMED (De Jong *et al.*, 1999).
- USPED: modelo de erosión de unidad de fuerza de corriente (unit stream power)-Modelo de deposición (Yang, 1997).

Todos los modelos mencionados pueden usar datos de ingreso derivados de los datos geográficos libremente disponibles en la internet (Saavedra y Mannaerts, 2003).

Se recomienda realizar el monitoreo de la erosión de los suelos una vez al año, preferentemente, utilizando información de la misma etapa del año.

6.2.2 Monitoreo de la calidad del agua de los escurrimientos superficiales

La calidad del agua puede ser alterada por efecto de la erosión, lo cual se evidencia con el aumento de sedimentos en suspensión. Por lo tanto, realizar monitoreos de la calidad del agua de los escurrimientos permite evaluar la eficiencia de las estructuras de la Infraestructura Verde Vial diseñadas para regular la erosión, el arrastre de sedimentos y contaminantes que pueden derivar hacia los principales arroyos o cuerpos de agua asociados a la Infraestructura Verde Vial.

El monitoreo se debe realizar previo al inicio de la época de lluvias y de manera posterior al menos 1 vez por mes durante este periodo, tomando muestras de agua en los puntos de confluencia con las redes hidrológicas y cuerpos de agua que son seleccionados de acuerdo con la escala de trabajo.

6.2.3 Monitoreo de las propiedades físico-químicas del suelo

Se recomienda monitorear el cambio en las propiedades de los suelos que son intervenidos por técnicas de manejo, tales como el contenido de carbono, la disminución de la densidad aparente, la disminución de la resistencia a la penetración y el aumento en la estabilidad de agregados (Schoenholtz *et al.*, 2000). La medición de las propiedades físico-químicas del suelo permite evaluar la eficiencia de las estructuras de la Infraestructura Verde Vial. El monitoreo se puede llevar a cabo una vez por año, utilizando muestreos dirigidos o muestreo al azar, de acuerdo con la escala del proyecto.

6.2.4 Indicadores del funcionamiento de los componentes de la Infraestructura Verde Vial para el manejo y conservación de suelos

La evaluación del funcionamiento de las estructuras de la Infraestructura Verde Vial diseñadas para la conservación de los suelos se plantea a partir de diferentes indicadores, tales como:

- Parámetros físico-químicos del suelo.
- Evidencias de pérdida de suelo por erosión, medida a través de la pérdida de carbono almacenado en los horizontes superficiales, asimismo, a través del cambio de la densidad aparente.
- Establecimiento y desarrollo de la vegetación.
- Cobertura vegetal de protección del suelo, ya que se asocia vegetación a la mayoría de las estructuras de la Infraestructura Verde Vial diseñadas para fines de conservación de suelo, indicadores como sobrevivencia de las especies y densidad de establecimiento son indicadores de eficiencia.
- Calidad del agua de los escurrimientos. La erosión de suelo se refleja a través del aumento de sedimentos en los escurrimientos debido al desprendimiento de las partículas del suelo. Por lo tanto, indicadores como turbidez del agua de escurrimiento en pequeños arroyos permiten evaluar la eficiencia de las estructuras de la Infraestructura Verde Vial en el control de la erosión y aumento de infiltración.
- Desde el punto de vista químico, el pH del agua de los escurrimientos también permite evaluar la capacidad de retención de agua en el suelo y, por lo tanto, la eficiencia de las estructuras.

A escala regional, la cobertura de vegetación en las zonas aledañas al área de construcción también puede ser un indicador de eficiencia de las estructuras de la Infraestructura Verde Vial que tienen como objetivo el manejo y la conservación del suelo.

6.2.5 Evaluación del funcionamiento y medidas correctivas de los componentes de Infraestructura Verde Vial para el manejo y conservación de suelos

El mantenimiento de reparación describe las tareas intermitentes que pueden ser necesarias para rectificar fallas asociadas con el sistema, aunque la probabilidad de las fallas puede minimizarse mediante un buen diseño, construcción y actividades de conservación regulares. Cuando se considere necesario realizar trabajos de reparación, es probable que se deba a características específicas del sitio o eventos imprevistos, por lo que los tiempos son difíciles de predecir. En este sentido, las estructuras de la Infraestructura Verde Vial pueden evaluarse a diferente escala de tiempo:

- Corto tiempo (meses) a partir del establecimiento de la vegetación, evaluando el porcentaje de sobrevivencia de la vegetación establecida.
- Mediano tiempo (1-2 años), evaluando el aumento en la densidad y la diversidad de especies vegetales, así como el aumento en el contenido de humedad del suelo y la disminución de sedimentos en los escurrimientos superficiales.
- Largo plazo (> 2 años), evaluando el aumento en superficies vegetadas, el contenido de carbono en el suelo, la estabilidad de agregados, la disminución de la densidad aparente y el aumento en el contenido de nutrientes disponibles para las plantas.

El inadecuado funcionamiento de las estructuras de la Infraestructura Verde Vial puede ser corregido a partir de los resultados del monitoreo. Las medidas correc-

tivas deben considerar principalmente los aspectos de protección de los servicios ecosistémicos y de la propia conformación técnica de la estructura.

6.3 Monitoreo de los componentes de la Infraestructura Verde Vial en materia de hidrología

Los trabajos de monitoreo en materia de estructuras que permiten el manejo hidrológico en una Infraestructura Verde Vial pueden dividirse en tres tipos principales: mediciones en serie de tiempo o continuas, trabajos de inspección y trabajos de muestreo y, en el caso de pozos, aforos. Éstos pueden generalizarse para todos los componentes de la Infraestructura Verde Vial en materia de hidrología (en específico con la finalidad de aumentar la calidad del agua), pues todas deben cumplir con los mismos requisitos de funcionalidad y calidad.

I. Monitoreo de mediciones en series de tiempo.

Consiste en la obtención de datos continuos en el tiempo para conocer información hidrológica como: eventos de precipitación (es posible determinar también periodos de sequía o eventos extraordinarios), registros de caudales, escurrimiento y cambios en parámetros del agua. A continuación, algunos ejemplos de los datos que pueden registrarse:

- Información meteorológica (temperatura, humedad, etcétera).
- Información hidráulica (registro de niveles freáticos).
- Otros parámetros (cambios en la conductividad eléctrica del agua, temperatura, pH, etcétera).

La información meteorológica e hidrológica puede consultarse en las estaciones meteorológicas oficiales de la CONAGUA (Estaciones Meteorológicas Automáticas - EMAS) más cercanas al punto de interés, mientras que los parámetros hidráulicos y químicos deberán monitorearse con instrumentos y herramientas instaladas en sitio y que tengan la capacidad de generar la serie de tiempo correspondiente. La descarga o recolección de datos pueden programarse junto con los trabajos de mantenimiento ocasionales, mientras que su cuidado y mantenimiento se realiza durante los trabajos regulares.

II. Monitoreo de trabajo de inspección.

Dependiendo de los objetivos y del tipo de componente de la Infraestructura Verde Vial se determinará el tipo de inspección necesaria. Ésta puede ser continua, pero a diferencia de las series de tiempo se realiza por periodos más cortos durante los periodos de evaluación o cuando se trata de una prueba piloto.

En particular, para el caso de las estructuras de infiltración, cuyo objetivo es beneficiar la recarga del acuífero que posteriormente se utiliza como fuente de abastecimiento para el consumo humano, se recomienda que el monitoreo de inspección permanezca constante o al menos un periodo de tiempo, donde se garantice que la calidad del agua no se verá modificada si las condiciones de los componentes de la Infraestructura Verde Vial no se alteran. Este periodo puede ser desde un año hasta cinco, pero dependerá directamente de las condiciones hidrológicas del sitio. Es posible realizar el trabajo de inspección periódicamente junto con las actividades de mantenimiento.

A continuación se describen algunos de los instrumentos más utilizados para el monitoreo de las estructuras de la Infraestructura Verde Vial de forma continua o de inspección:

- Información hidrológica.

Pluviómetro: éste se compone por un embudo colector de lluvia enganchado a una base plástica con mecanismo de inclinación. Cuenta con un filtro para impedir la entrada de desechos y púas de seguridad para evitar el anidamiento de aves u otros animales. Generalmente es parte de una estación meteorológica.

Sensor de temperatura y humedad relativa: consiste en un dispositivo que mide y registra de manera continua la temperatura ambiente, el punto de rocío, la humedad y otros parámetros que dependerán de las características del sensor. Generalmente es parte de una estación meteorológica.

- Información hidráulica.

Regla o regleta: debido a la necesidad de estimar el caudal de entrada o salida de algunas estructuras de la Infraestructura Verde Vial, es necesario tener mediciones de los niveles de agua que se alcanzan en cada una, este valor debe medirse en una sección conocida (dimensiones medibles) y de fácil acceso. También es posible recurrir a reglas o sondas electrónicas para medir los niveles de pozos o secciones de caudales durante el trabajo de inspección.

- Calidad del agua.

DataLogger o Leve Logger: son sondas capaces de medir la conductividad y la temperatura de forma continua. Algunos modelos pueden medir simultáneamente el tirante de agua sobre ellos y son útiles para obtener información de manera continua y observar información anómala o cambios que signifiquen modificaciones en la calidad de agua.

Multiparamétricos: se utilizan en puntos de medición determinados y son útiles para realizar una primera estimación de parámetros físico-químicos que indican si existe una modificación en la calidad del agua.

III. Monitoreo de muestreo.

Es quizá el elemento de monitoreo más importante desde el punto de vista de la calidad del agua y debe realizarse por profesionales de la materia de acuerdo con un programa de monitoreo establecido desde la etapa de diseño de las estructuras de la Infraestructura Verde Vial. Se diferencia de la etapa de inspección en la temporalidad y sus objetivos principales. Los trabajos de inspección generalmente se realizan durante las etapas prueba o durante los primeros años de vida de la Infraestructura Verde Vial, con la finalidad de asegurar su funcionamiento y la obtención del servicio ecosistémico para el que fueron construidos. El trabajo de muestreo se realiza en periodos de tiempo más extensos después de la construcción de la Infraestructura Verde Vial y se realiza dentro y fuera de la misma, por ejemplo, se realizan muestreos en los cuerpos de agua que podrían estar influenciados por los procesos de drenaje e infiltración. Además, el trabajo de muestreo está enfocado en monitorear y salvaguardar la calidad de agua y las posibles afectaciones que los elementos de la Infraestructura Verde Vial tienen sobre el ciclo natural del recurso.

Los muestreos deben realizarse de forma periódica y continua, y deberán cumplir los requisitos de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 "salud ambiental, agua para uso y consumo humano - límites permisibles de calidad y tratamientos a que

debe someterse el agua para su potabilización" (monitoreo) y Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003 (requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada). En caso de obras de drenaje se deberá observar lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales), la NOM-002-SEMARNAT-1996 (que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal) y la NOM-003-SEMARNAT-1997 (que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público).

6.4 Monitoreo de los componentes de la Infraestructura Verde Vial en materia de servicios ambientales

6.4.1 Monitoreo de componentes para la reducción de gases de efecto invernadero (energías renovables)

Para evaluar el funcionamiento de las estructuras de la Infraestructura Verde Vial que están diseñadas para proveer de energía eléctrica, ya sea por sistemas de generación eólica o fotovoltaica, se requiere realizar monitoreos sistemáticos con una periodicidad determinada por los especialistas que hayan diseñado los sistemas y también acorde a los manuales operativos de los equipos, en función de detectar fallas o desvíos en el funcionamiento, lo que se traduciría en una menor provisión de energía a la Infraestructura Verde Vial o incluso una detención total de este servicio.

Las funciones principales de un sistema de monitoreo de sistemas de generación de energía renovable son:

- Recopilar datos de componentes importantes (inversores, datos meteorológicos, medidor de energía, señales de estado) con cada dispositivo registrado por separado.
- Funcionalidad de alarma básica.
- Proporcionar una copia temporal de seguridad de los datos.

El intervalo de grabación (también llamado granularidad) del registro de datos deberá oscilar entre 1 minuto y 15 minutos. Dentro de un entorno de monitoreo, la granularidad deberá ser uniforme para todos los datos recopilados. Como requerimiento mínimo, los *data loggers* deberán almacenar al menos un mes de datos. Los datos históricos se deberán respaldar constantemente enviándolos a servidores externos y después de cada falla de comunicación el registrador de datos deberá enviar automáticamente toda la información pendiente.

Además, la transmisión de datos deberá ser segura y estar encriptada (ciberseguridad). También deberá existir un cuaderno de bitácoras para registrar los cambios de configuración (especialmente relevante cuando se actúa como controlador de la planta eléctrica).

Como requerimiento mínimo, el sistema de monitoreo deberá enviar las siguientes alarmas por conexión a internet: pérdida de comunicación, planta detenida, inversor detenido, planta con bajo rendimiento, datos del recurso renovable, factor de ensuciamiento, inversor con bajo rendimiento (p. ej. debido a sobrecalentamiento), planta en operación con Uninterrupted Power Supply (UPS), detección de intrusos y detección de incendios, entre otros.

6.4.1.1 Monitoreo de sistemas de energía solar

En general, el sistema de monitoreo deberá permitir el seguimiento de los flujos de energía dentro de un sistema fotovoltaico. Este monitoreo informa sobre los parámetros que determinan la cadena de flujo, conversión (DC-AC) y transformación de energía. El rendimiento y pérdidas siempre se normalizan con la potencia fotovoltaica instalada en condiciones normales de prueba en kilowatt-pico para facilitar la comparación del rendimiento.

El principal indicador para evaluar el funcionamiento de estos sistemas es la energía eléctrica generada en función a la disponibilidad del recurso solar. Derivado de lo anterior, es importante contar con la información relativa al sitio y verificar si los estimados de generación eléctrica responden a lo calculado en las etapas previas.

6.4.1.2 Monitoreo de sistemas de energía eólica

El principal indicador para evaluar el funcionamiento de estos sistemas es la energía eléctrica generada en función a la disponibilidad del recurso eólico. Derivado de lo anterior, es importante contar con la información relativa al sitio y verificar si los estimados de generación eléctrica responden a lo calculado en etapas previas.

6.4.1.3 Medidas correctivas en caso del desvío del funcionamiento de sistemas de energía solar y eólica

El mantenimiento correctivo consiste en todas las actividades destinadas a restaurar el buen funcionamiento de un sistema eólico o fotovoltaico y puede incluir sustitución de equipos o componentes defectuosos para que los sistemas puedan realizar la función requerida. El mantenimiento correctivo se lleva a cabo después de la detección de una falla, ya sea mediante supervisión y monitoreo remoto o durante inspecciones periódicas y actividades de medición específicas.

El mantenimiento correctivo incluye tres actividades principales:

- I. Diagnóstico de fallas, también conocido como análisis de problemas para identificar la causa y localización de la falla.
- II. Reparación temporal, para restaurar la función requerida de un elemento defectuoso por un tiempo limitado, hasta que se lleve a cabo una reparación.
- III. Reparación, para restaurar la función requerida de manera permanente. Hay que considerar en el caso de los sistemas de generación que necesitan desconectarse de la red eléctrica para su mantenimiento correctivo, que esto deberá realizarse cuando el sistema no se encuentre operando para que la generación de energía en general no se vea afectada. El mantenimiento correctivo se puede dividir en tres niveles de intervención:
 - 1er nivel: intervención para restaurar la funcionalidad de un dispositivo sin la necesidad de sustituir un componente. En general, este tipo de mantenimiento correctivo incluye sólo la actividad llevada a cabo por un técnico (especializado para el mantenimiento o subcontratado).

- 2o nivel: intervención para restaurar la funcionalidad de un dispositivo que requiere la sustitución de un componente. En general, este tipo de mantenimiento correctivo incluye sólo la actividad llevada a cabo por un técnico especializado, más la intervención física en el dispositivo para sustituir la pieza. Un ejemplo sería la falla del ventilador del inversor donde el equipo de mantenimiento interviene para sustituir el ventilador y restaurar la funcionalidad del inversor.
- 3er nivel: intervención para restaurar la funcionalidad del dispositivo con la necesidad de intervenir en el *software* del dispositivo. En general, este tipo de mantenimiento correctivo incluye tanto la actividad realizada por un técnico especializado como la intervención de parte del equipo de mantenimiento del fabricante del dispositivo o de otras empresas externas que estén autorizadas por el fabricante del dispositivo para intervenir y restaurar la funcionalidad del equipo. Un ejemplo de 3er nivel de mantenimiento correctivo podría implicar una falla en el equipo o un componente específico roto que podría ser restaurado sólo a través de la reconfiguración o actualización de *software* por parte del fabricante.

Por ejemplo, en caso de baja de generación en el sistema eólico se deberán realizar los mantenimientos preventivos y correctivos. Si pasado este punto y ante presencia de viento no se observa generación eléctrica, es probable que la pequeña turbina eólica haya sufrido una avería, por lo que deberá ser remplazada. En el caso de la generación solar, los paneles fotovoltaicos con bajo rendimiento o sin generación deberán ser remplazados, tomando en cuenta la potencia de éstos, ya que todo el sistema estará diseñado para funcionar con esa capacidad.

6.4.2 Monitoreo de componentes para la reducción de ruido

6.4.2.1 Barreras acústicas

Para monitorear la eficiencia de las pantallas acústicas, el indicador más adecuado y fácil de usar para medir el ruido ambiental es el nivel de presión sonora (NPS) expresado en dB y corregido por el filtro de ponderación (A), que permite que el sonómetro perciba la frecuencia (Hz) de manera similar a como los escucha el oído humano (NPS db(A)). Se sabe que el daño acústico es proporcional tanto a la intensidad del sonido como al tiempo de exposición, es por ello que se recomienda seguir las Normas como son la NOM-079-ECOL-1994 (12/ENE/95), NOM-080-ECOL-1994 (13/ENE/95), NOM-081-ECOL-1994 (13/ENE/95) y NOM-082-ECOL-1994 (16/ENE/95) para evaluar la efectividad de estos componentes.

Por otro lado, aunque las normas dictan los niveles permisibles de ruido, no siempre están en completa conformidad con la percepción de la población, por lo que se puede complementar el análisis acústico con encuestas de satisfacción por parte de las comunidades locales.

Se recomienda, durante la vida útil de la Infraestructura Verde Vial en la que se instalen estos componentes, realizar los monitoreos de nivel de ruido de forma periódica para verificar que las pantallas acústicas cumplan con su objetivo. En caso de detectar que esto no ocurre, se recomienda recurrir a cambios de material o diseño de estas estructuras.

6.4.3 Monitoreo de componentes para la conectividad ecológica

6.4.3.1 Pasos para fauna

La evaluación periódica del uso de los pasos para fauna es fundamental para determinar su eficiencia y eficacia. Con ello se obtiene información tangible que permite mejorar el diseño y construcción de dichos pasos para obtener mejores resultados.

El monitoreo de los pasos para fauna debe preverse desde la etapa de proyecto, ya que para tener resultados confiables se necesita planificar oportunamente las formas en cómo se realizará el seguimiento de la operación de los pasos y de los resultados sobre el atropello de fauna en la infraestructura vial, y así dotarlos de las estructuras de soporte necesarias para el procedimiento de monitoreo desde el momento de su construcción.

Para ello, es necesario tomar en consideración las diferencias que existen entre los distintos pasos para fauna, las especies objetivo para las que han sido construidos, los ecosistemas circundantes y su variabilidad estacional; particularmente el efecto de las condiciones climáticas en los dispositivos de monitoreo, así como condiciones de operación que presenta la infraestructura vial. El diseño y los métodos para la evaluación de los pasos para fauna deben ser adecuados para cada caso a partir de los lineamientos y recomendaciones generales que se brindan.

Para la adecuada selección de los indicadores de monitoreo de los pasos para fauna es importante considerar los siguientes datos y que el especialista en fauna defina cuáles son los más adecuados a partir de los siguientes criterios:

- Conectividad ecológica. Identificar si la superficie en donde se encuentran inmersos los pasos para fauna permite la conexión de un hábitat de interés para la conectividad ecológica de las especies.
- Conexión con áreas de recursos. Identificar si los pasos para fauna permiten conectar el hábitat con áreas de uso diario, en donde los animales acceden a recursos como es el caso de alimento, agua, refugio, entre otros. Se requiere esta identificación con mayor detenimiento cuando se trata de áreas en donde se conecta un hábitat natural con zonas agrícolas.
- Presencia de especies objetivo. Identificar las especies objetivo para las cuales fueron construidos los pasos para fauna, con énfasis en aquellas especies que se encuentren protegidas por las leyes mexicanas, sean endémicas o tengan una importancia ecológica o económica.
- Frecuencia de atropello. Examinar las inmediaciones de la zona del tramo carretero en donde se encuentran inmersos los pasos para fauna, e identificar las evidencias de incidentes viales en donde la fauna se ve involucrada.
- Características topográficas. Revisar que los accesos a los pasos para fauna subyacentes alcancen el mismo nivel que los terrenos adyacentes a la infraestructura vial.

Para mayores detalles de la metodología recomendada para implementar el monitoreo, consultar el *Manual de diseño de pasos para fauna silvestre en carreteras* de la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT (2020).

6.5 Monitoreo para otras alternativas de componentes de la Infraestructura Verde Vial

6.5.1 Pavimentos permeables

Será necesario inspeccionar la superficie de los pavimentos permeables para revisar su integridad y detectar el deterioro (p. ej. las posibles lascas o astillas). Esto deberá realizarse cada año como parte del monitoreo y el mismo mantenimiento de la Infraestructura Verde Vial.

6.5.2 Tecnosuelos

El objetivo de la construcción de tecnosuelos es construir un material que emule las propiedades de los suelos naturales, por lo tanto, en materia de monitoreo de este tipo de componente, esta actividad se integra a las actividades de monitoreo en conjunto de la Infraestructura Verde Vial. Como parámetros a evaluar es importante el seguimiento de los niveles de pH, la conductividad eléctrica y la compactación del suelo, ya que estas variables permiten evaluar la pertinencia y la respuesta de la restauración de la vegetación en cada sitio. Este monitoreo se debe hacer al menos 2 veces al año para valorar la sobrevivencia de las especies con relación a las condiciones físico-químicas del suelo.

I. DETERMINACIÓN DE pH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.

El monitoreo en sitio se lleva a cabo a partir de una submuestra, la cual se mezcla con agua en una proporción 1:2.5 y es en ésta donde se determinan los valores de estos parámetros. Actualmente, en el mercado se pueden obtener sensores para determinar estas dos variables o el pH a partir del uso de tiras indicadores de pH, como se muestra en la Figura 6.1.

Figura 6.1
Determinación de pH de las muestras de suelo natural y suelos artificiales.



Fuente: Tomado de <https://www.portalfruticola.com/noticias/2018/12/17/como-medir-y-corregir-problemas-de-ph-del-suelo-aplicacion-de-enmiendas/>

El pH es una variable que permite conocer la disponibilidad de nutrientes en el suelo y el establecimiento de organismos que favorecen los ciclos biogeoquímicos. En este sentido, los valores deseables están entre 5.5 y 8 de pH. Asimismo, la conductividad eléctrica esperada es menor a 2 ms/cm.

II. EVALUACIÓN DE LA COMPACTACIÓN.

La compactación de los suelos se puede llevar a cabo a partir de la evaluación de la resistencia a la penetración o la determinación de la densidad aparente del suelo. Esta variable física es una de las más importantes para conocer el desempeño de los suelos en cuanto a la capacidad de almacenamiento, soporte y resistencia a la erosión.

La resistencia a la penetración se debe evaluar en el sitio y se lleva a cabo utilizando equipos conocidos como penetrómetros, que miden directamente esta variable (Ver Figura 6.2).

Figura 6.2
Ejemplos de penetrómetros para evaluar la compactación del suelo.



Por otro lado, se pueden obtener muestras para procesarlas en el laboratorio y a partir de éstas conocer directamente la densidad de los materiales. El método más comúnmente usado es el método del cilindro.

Figura 6.3
Esquema para toma de muestras de densidad aparente de los suelos.



De acuerdo con la NRCS - USDA, los valores que se esperan de la densidad aparente de los suelos dependen de la textura de éstos (Tabla 6.2), un incremento por encima del valor ideal indica un efecto directo en el crecimiento de las raíces, pero también un efecto negativo en la disminución de la capacidad de almacenamiento de agua y regulación de gases. Lo mismo aplica para los suelos artificiales, por lo tanto, es necesario conocer los valores iniciales de densidad de los materiales para evaluar su comportamiento en el tiempo.

Tabla 6.2
Relación entre los valores de densidad aparente de los suelos basada en la textura.

Textura del suelo	Densidad aparente ideal (g/cm ³)	Densidad que puede afectar el crecimiento de las raíces (g/cm ³)	Densidad que restringe el crecimiento de las raíces (g/cm ³)
Arenoso y franco arenoso.	Menor a 1.60	1.69	Mayor a 1.80
Franco arenosos y franco.	Menor a 1.40	1.63	Mayor a 1.80
Franco arcillo arenoso, franco, franco arcilloso.	Menor a 1.40	1.60	Mayor a 1.75
Limoso, franco limoso.	Menor a 1.30	1.60	Mayor a 1.75
Franco limoso, franco arcillo limoso.	Menor a 1.40	1.55	Mayor a 1.65
Arcillo arenoso, arcillo limoso, franco (arcilla 35 a 40%).	Menor a 1.10	1.49	Mayor a 1.58
Arcilloso (arcilla mayor a 45%).	Menor a 1.10	1.39	Mayor a 1.47

En resumen, las tareas de mantenimiento que demanda el monitoreo de los tecnosuelos son: el monitoreo de las propiedades físico-químicas y la revegetación de acuerdo con la siguiente Tabla.

Tabla 6.3**Requisitos de conservación para la construcción de tecnosuelos.**

Tarea	Frecuencia	Recomendaciones
Monitoreo de las propiedades químicas del suelo.	Realizar 2 por año durante el primer año y posteriormente, una vez al año.	<ul style="list-style-type: none"> Durante los dos primeros años realizar un monitoreo de las variables del suelo, tales como pH, conductividad eléctrica, densidad aparente y contenido de materia orgánica.
Revegetación/ reforestación.	Revisar 2 veces por año.	<ul style="list-style-type: none"> Monitoreo de la sobrevivencia de las especies utilizadas en las áreas habilitadas y si no se da una buena adaptación de éstas, cambiar la especie.

6.5.3 Sistemas inteligentes de transporte (conducción eficiente o ecodriving)

El monitoreo de este tipo de sistemas debe involucrar a la sociedad y sus gobiernos, ya que no sólo se trata de una cuestión en materia de seguridad vial y bienestar humano, sino que representa la posibilidad de actuar directamente en favor de la reducción de emisiones de GEI y del consumo de combustible.

En este sentido, para monitorear la eficiencia de la implementación de los sistemas inteligentes de transporte se deberán realizar estudios sobre la calidad del aire antes y después de la implementación de las prácticas para evaluar su funcionamiento.

6.5.4 Bajo puentes

La evaluación periódica del uso y estado de los bajo puentes es fundamental y permitirá determinar su eficiencia y eficacia. Para ello, se recomienda realizar las siguientes actividades:

- Encuestas de satisfacción con la población.
- Inventario de daños.
- A partir del estudio que determinó los objetivos del bajo puente, generar indicadores para determinar si éstos se están cumpliendo o no.
- Evaluar la participación de los ciudadanos.

CAPÍTULO 7

CASO DE ESTUDIO:

INTEGRACIÓN DEL CONCEPTO DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE VIAL A NIVEL DE PAISAJE

Generalidades

Para este apartado, lo que se destaca como punto de partida es la concepción del suelo como bien no renovable y como base de muchos servicios ecosistémicos que sobre él se desarrollan. En este sentido, y como se menciona en el capítulo de Planeación, la necesaria integración de visiones, misiones, intereses e iniciativas de los distintos sectores es el pilar para el desarrollo de proyectos armónicos con su contexto natural y construido.

Partiendo de este punto, el proyecto de Infraestructura Verde Vial que sea implementado será parte integral del todo armónico. No se podrán aprovechar al máximo las bondades de cada componente o elemento si éstos no se integran en metodologías de planeación como las sugeridas en el capítulo de Planeación.

Uno de los conceptos cada vez más empleados en el ámbito de la obra pública, es el de la prelación de las actividades, proyectos y obras. En el mismo sentido que la planeación integral, es necesario programar las diferentes iniciativas para su desarrollo armónico. Tal como lo establece un programa de obra o diagrama de Gantt, las actividades obedecen a una secuencia lógica para su mejor efectividad. Tal es el caso del aprovechamiento máximo del espacio y la prevalencia del concepto del suelo como un bien natural no renovable.

En este sentido, en este apartado se presenta un caso de estudio de aprovechamiento máximo del espacio y realce de la belleza paisajística, como ejemplo del proceso de creación de una Infraestructura Verde Vial.

7.1 Aprovechamiento máximo del espacio y realce de la belleza paisajística: el caso del Parador Turístico San Pedro de la carretera federal 57D

Tal y como se expuso en el Capítulo 2 de Planeación, para el desarrollo armónico de un proyecto de infraestructura verde y, en específico, en materia de aprovechamiento máximo del espacio, partimos de considerar al suelo como un bien natural no reno-

vable y sustento de los servicios ecosistémicos y de la necesidad de la adecuada integración y coordinación de los entes involucrados en el proyecto de Infraestructura Verde Vial para obtener el resultado esperado. La metodología de análisis y toma de decisiones multicriterio en una estructura como la expuesta en este documento, recoge una variada y numerosa serie de iniciativas y proyectos en torno a un proyecto marco de infraestructura verde. En específico, para el mejor desarrollo del territorio, la inclusión, la coordinación y la participación efectiva del mayor número de sectores, actores y proyectos e iniciativas relacionados, obtendrá un proyecto que se inserte en un contexto socioambiental de manera armónica y con visión duradera.

En este apartado se expondrá como un caso tipo la implementación del Parador Turístico San Pedro, en la carretera federal 57D, desde su creación, estimada a partir de la concesión de esta vía de comunicación en la administración de 1988-1994, hasta el día de hoy. En este caso de estudio se presenta una propuesta de diseño para integrar elementos que crecieron anárquicamente en esta construcción. Esta propuesta a manera de ejemplo pretende ser un diseño de conjunto integral, que aporte al concepto de infraestructura verde el aprovechamiento máximo del espacio y su realce como elemento de belleza paisajística y de oferta de servicios ecosistémicos. Se han incluido esquemas de diseño de paisaje para visualizar un desarrollo integral, con menor impacto al paisaje y el realce de la belleza del contexto natural.

7.1.1 Planeación integral de un parador de servicios turísticos dentro de un proyecto de Infraestructura Verde Vial

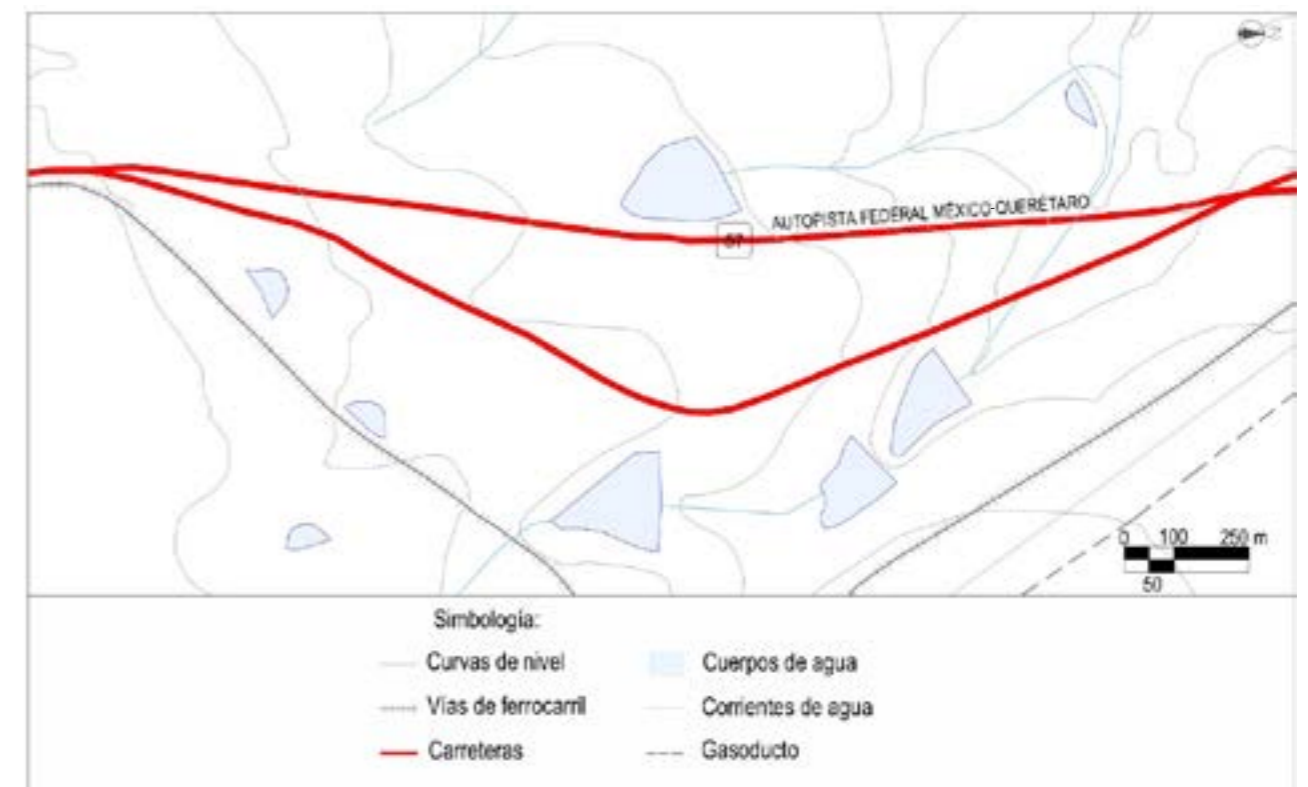
El caso de estudio que se presenta es un parador de servicios turísticos próximo a la caseta de cobro de Palmillas, en la carretera federal 57D, México-Querétaro. En el mismo, como se podrá observar en los esquemas que más adelante se presentan, el crecimiento de construcciones de diversos usos y actividades en torno al parador ocurre de manera anárquica y consume el suelo del entorno. Los elementos que se desarrollan desde sus inicios hasta la fecha son atraídos por la dinámica económica que generan tanto la estación de cobro, como el propio parador de servicios y sin un desarrollo integral del sitio en cuestión.

Las siguiente imagen ilustra la dinámica de crecimiento urbano que ha tenido este proyecto desde su construcción hasta 2020.

Figura 7.1
Dinámica de aprovechamiento del espacio en la carretera federal México-Querétaro 57D a través del tiempo.



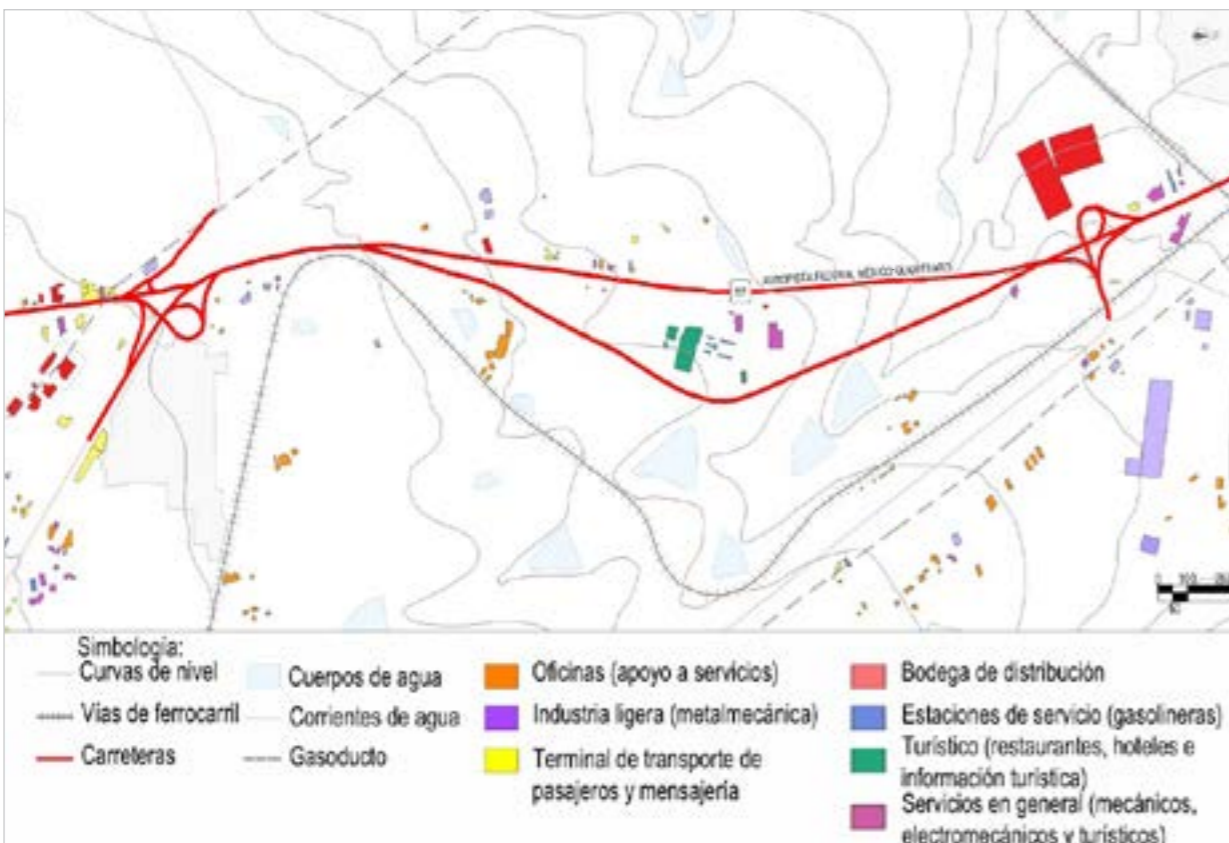
Autopista México-Querétaro 57D.



Parador Turístico San Pedro, 2008.



Parador Turístico San Pedro, 2013.



Parador Turístico San Pedro, 2020.

Como se puede apreciar, la interacción entre una plaza de cobro y un parador de servicios carreteros con el desarrollo propio de las comunidades en su entorno inmediato, están estrechamente ligadas y relacionadas con el desarrollo regional. Por ello, se requiere de la planeación y coordinación de todos los actores y sectores en un desarrollo armónico del proyecto.

Dada la aglomeración de actividades y consumo irregular del suelo, se plantea, acorde con las superficies representadas en los esquemas durante un periodo de 12 años, una propuesta de optimización del uso del espacio al interior del parador, que incluye todas las actividades y los usos que se desarrollaron en la zona.

Figura 7.2
Propuesta de aglomeración de construcciones dentro del Parador Turístico San Pedro 2020.

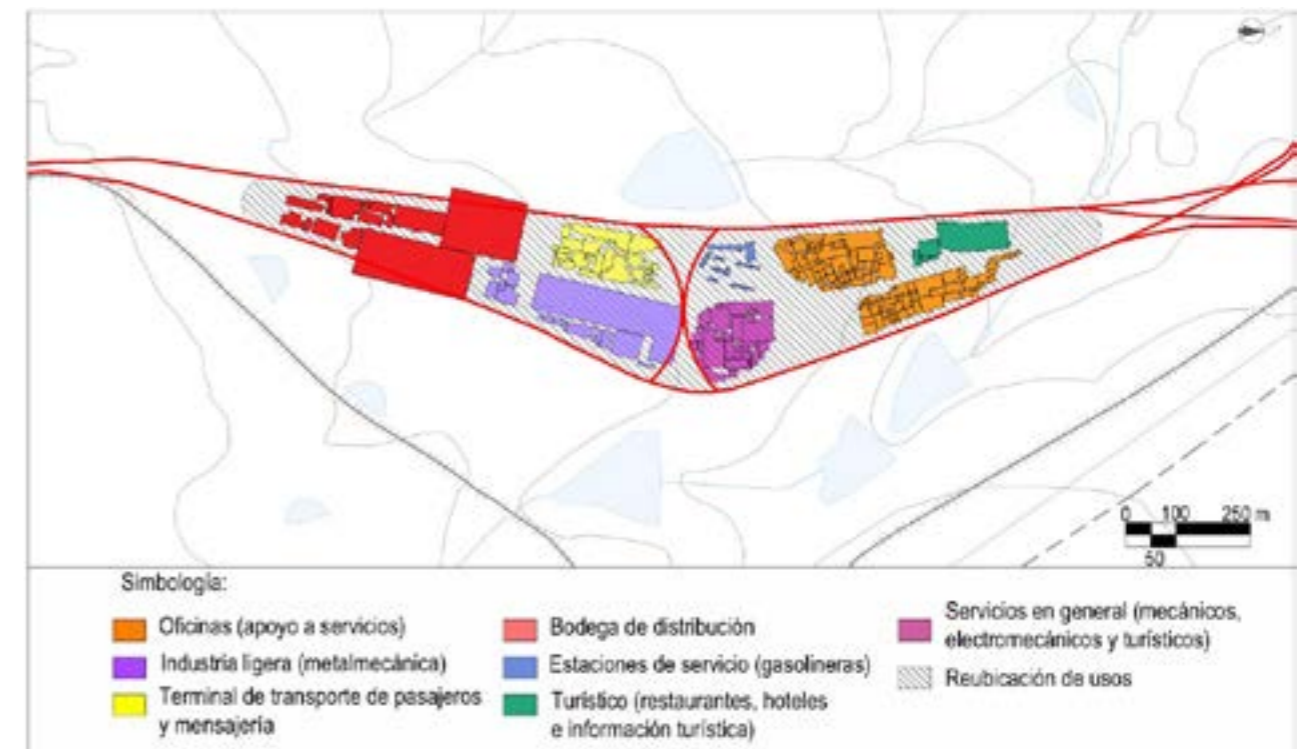


Figura 7.3
Propuesta de reorganización de flujos. Parador Turístico San Pedro.



Una vez analizada la viabilidad de integrar todas las construcciones de las diferentes actividades que se desarrollan en el entorno inmediato del parador turístico San Pedro, se presenta una propuesta de zonificación por usos de suelo y actividades afines, cuya integración dentro de la misma superficie que ocupa actualmente el parador pretende demostrar la posibilidad de integrar diferentes actividades, intereses, proyectos e iniciativas, proyectadas en un tiempo específico (en este caso, al menos 20 años).

Figura 7.4
Propuesta de conjunto. Parador Turístico San Pedro.

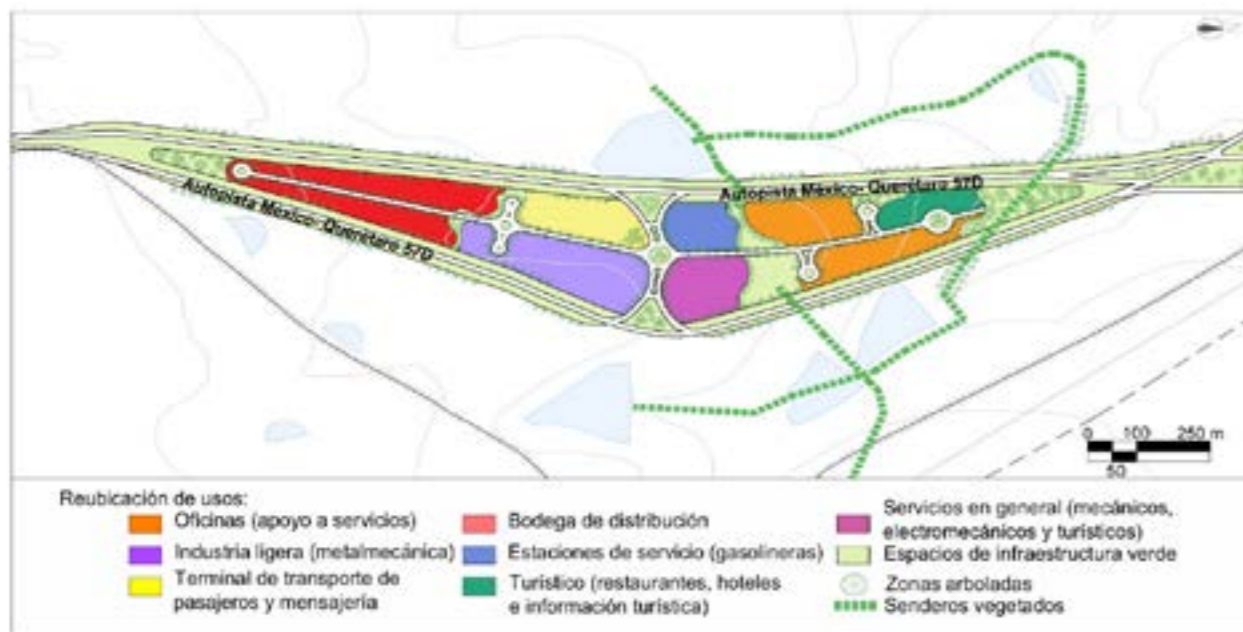
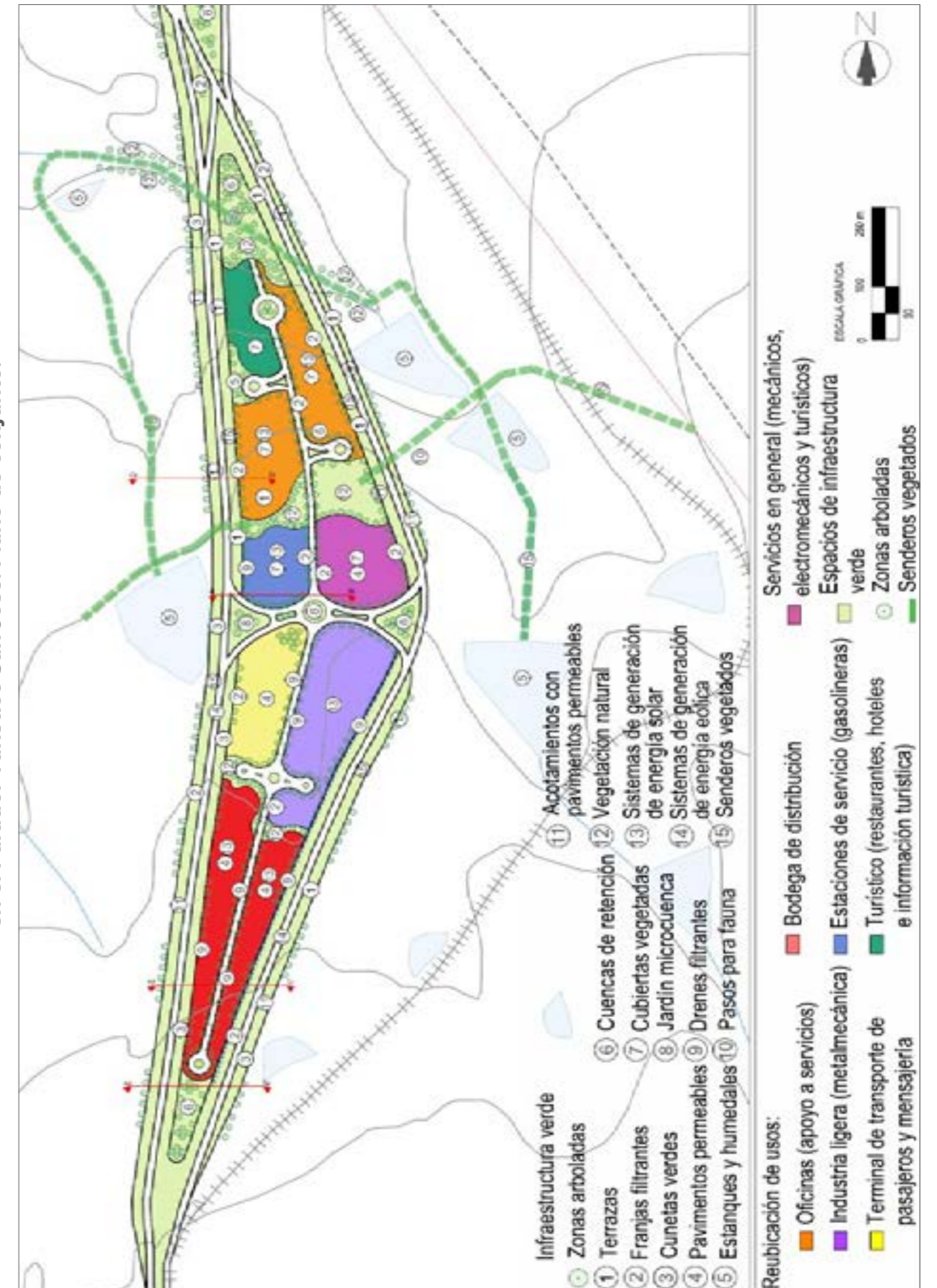


Figura 7.5
Propuesta de estrategias y componentes de una Infraestructura Verde Vial en el Parador Turístico San José. Plano de conjunto.



De la mano de una planeación integral de actividades que favorecen el uso máximo del suelo y, por lo tanto, la conservación del suelo en el contexto inmediato como bien no renovable, se desarrollan las estrategias de Infraestructura Verde Vial para un mejor manejo del agua, uso de energías renovables, recuperación de la cobertura vegetal, entre otros beneficios que es posible obtener a partir de la planificación de un proyecto de esta naturaleza. En el mejor de los casos representan también acciones de restauración de los impactos negativos del proyecto.

En los esquemas de las Figuras 7.4 y 7.5 se plantea un proyecto conceptual de zonificación de usos de suelo dentro del entronque y zona de servicios denominada Parador Turístico San Pedro desde una perspectiva de aprovechamiento racional del suelo urbano y desde un enfoque de Infraestructura Verde Vial, evitando y previniendo de esta manera el aprovechamiento anárquico del uso de suelo.

7.1.1 Ventajas y desventajas de su construcción

A manera de análisis FODA, la propuesta antes descrita representa, sobre todo, un reto en la coordinación, planeación, diseño y en general la conceptualización del proyecto. Y en ese sentido, es donde se presentan las mayores amenazas y oportunidades a la vez para el desarrollo de proyectos similares. La ventaja de su concreción sería un desarrollo integral, sustentable y de operación duradera.

Como única desventaja y debilidad vista desde la perspectiva actual, se señala la falta de coordinación que existe entre dependencias y niveles de gobierno para un mejor desarrollo del territorio. Por lo que es aquí donde se deben de realizar los mayores esfuerzos desde la coordinación del proyecto, la integración de los sectores y de los actores involucrados en un proceso de participación y decisión efectivo, así como la integración de las diferentes iniciativas de dichos sectores y actores en un todo armónico. Desde sus distintas competencias, el diseño y/o aplicación de instrumentos de planeación y regulación de proyectos, hasta la incorporación de los más variados y efectivos recursos de la tecnología en su construcción y operación.

Existen casos análogos de esquemas de desarrollo, operación y mantenimiento de proyectos similares, como el caso de los bajo puentes en la CDMX expuestos en este Manual, que se apoyan en instrumentos jurídico-administrativos y financieros ya implementados en otras ciudades, ámbitos y geografías, como esquemas de Asociación Público-Privada. Ahí residen las fortalezas y oportunidades de una mejor implementación de los proyectos de infraestructura verde.

7.1.2 Estrategias para la construcción

En el caso de estudio específico, y desde una coordinación o gerencia de proyecto, se debería de identificar a los actores y sectores involucrados en el desarrollo del proyecto. Como podrían ser en este caso la SICT como promotor del proyecto, pero de la mano de otras instancias con injerencia en el territorio (SEMARNAT, SE, FONATUR, CONAGUA y SHCP, entre otras), dependencias de los tres niveles de gobierno y en especial la localidad de Puerta Palmillas, donde se ubica el parador y sus habitantes organizados.

En un proceso como el planteado en este apartado se determinarán objetivos, metas, estrategias, acciones y proyectos a desarrollar, paralelos al proyecto en cuestión, para un desarrollo integral. Derivado de esta integración se podrá planear, diseñar y programar el conjunto en el proyecto o plan maestro correspondiente, tal y como se expone en el capítulo de Planeación de este Manual. Deberá formularse un proyecto que atienda los requerimientos de cada uno de los sectores en un tiempo definido (aquí representados en el resultado de desarrollo de 20 años) y debidamente distribuidos atendiendo actividades afines. Además de los requerimientos funcionales propios de cada sector, se desarrollará un proyecto integral que permita la construcción programada de los elementos.

Dichos elementos edificados, deberán de considerar e integrar las mejores prácticas en desarrollo sustentable, muchas de las mencionadas en este Manual y que permiten el mejor manejo de agua, la generación y uso de energías renovables y la protección de los suelos, agregando valor al suelo que quedó irremediamente impactado por la autopista.

En esta etapa del proyecto nos concentramos en aquellas acciones que mitiguen el impacto en el paisaje, a través de acciones de revegetación con criterios de diseño paisajístico (Figura 7.6), pero atendiendo las condiciones de funcionalidad de una infraestructura verde como la que se pretende desarrollar.

Figura 7.6
Propuesta de estrategias o acciones de infraestructura verde en las diferentes secciones de una carretera.



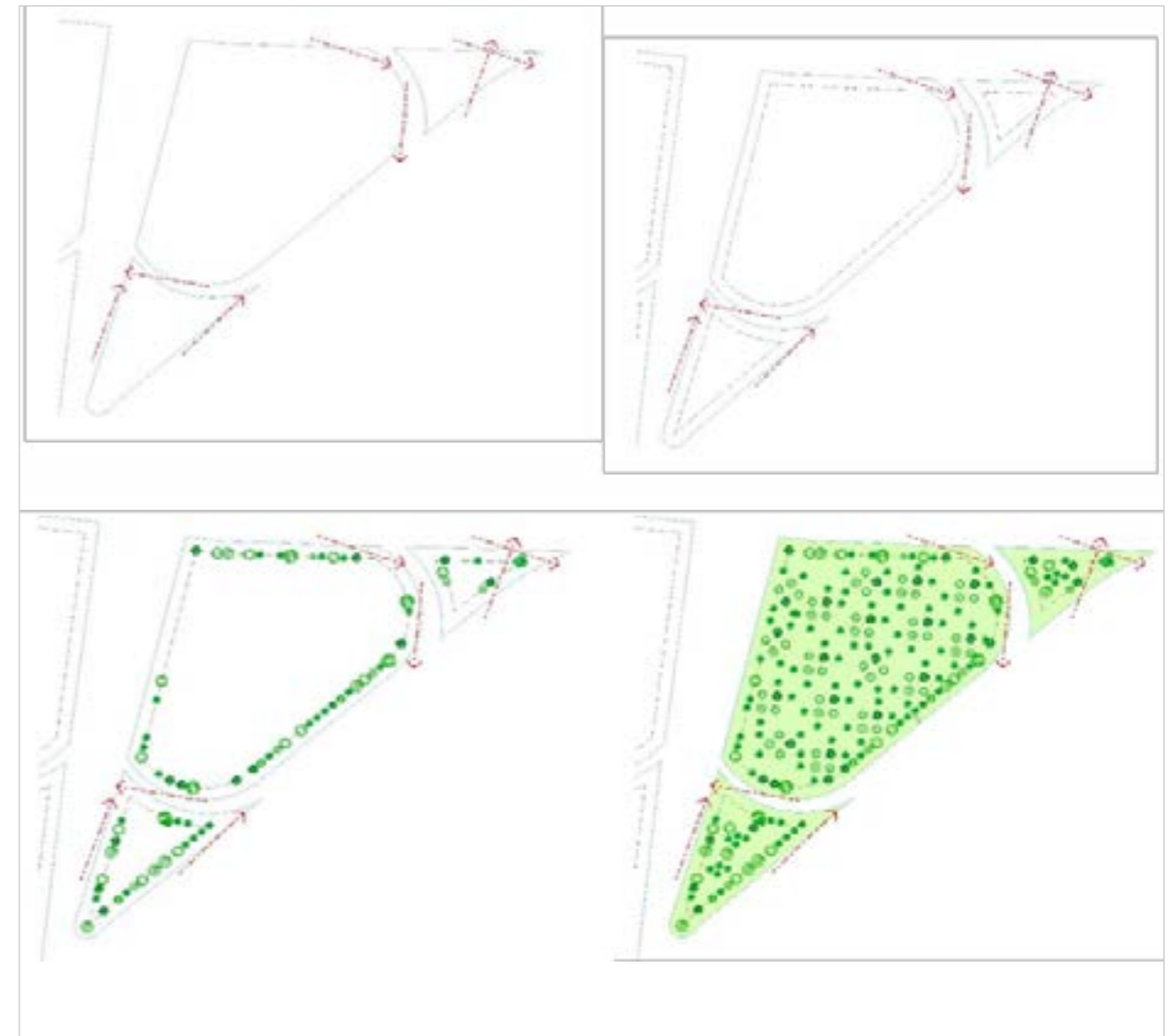


Además de las acciones en materia de infraestructura verde, se enumeran algunas recomendaciones de diseño integradas a las obras y acciones que permiten lograr un desarrollo armónico con el entorno:

- Enmarcar los accesos al entronque.
- Protección y recuperación de los cuerpos de agua y los escurrimientos.
- Colocación de vegetación que destaque en las intersecciones.
- Enmarcar las visuales hacia los cuerpos de agua.
- Crear zonas *buffer* entre los distintos usos para mitigar el ruido de la carretera y del resto de usos.
- Conectar senderos vegetados hacia el entronque y las zonas remanentes de vegetación nativa.
- Consolidar espacios de filtración de agua.
- Retrasar las escorrentías hacia las zonas habitadas y la carretera. Crear barreras de vegetación y piedra en las áreas que tiene erosión hídrica.
- Plantaciones diversas con especies vegetales nativas procurando espacios para mantener la biodiversidad.
- Conservar la vista escénica conformada por las elevaciones, desarrollando construcciones más horizontales que verticales para no interferir en la cuenca visual abierta.
- Distinto tratamiento de la vegetación que refleja los diferentes tipos de comunidades vegetales del sitio.
- Plantación de la vegetación en el derecho de vía de manera perpendicular a la carretera para crear direccionalidad y dinamismo.
- Mantener la visibilidad del conductor libre, respetando el derecho de vía (restringir la vegetación al uso de arbustos y herbáceas de tamaño bajo).
- Manejo de árboles y/o arbustos caducifolios o con floración llamativa dentro de los sitios de afluencia peatonal.
- En tramos lineales extensos, plantar árboles en alineamientos cortos o con al menos 3 especies distintas para no provocar agotamiento visual del conductor.
- Crear entornos de descanso arbolados (colocación de infografías de educación ambiental para los viajeros).
- Separación de vialidad y espacios peatonales con plantaciones que delimiten las zonas.

Igualmente, para el caso específico de la revegetación de los entronques, ramales y linderos de derecho de vía, se deberán tomar en cuenta las consideraciones de funcionalidad de la propia infraestructura vial. Es prioritario no obstruir la visual del usuario de carretera. Como se verá en los siguientes esquemas, se prevé la integración del usuario en las vías en las que se incorpora, sin la afectación de la visual por objetos de carácter vertical y que la obstruyan, como puede ser el arbolado. La dimensión resultante será producto de aplicar la fórmula de la velocidad y la distancia incorporada en el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras (SCT, 2018), en el capítulo de paisaje.

Figura 7.7
Propuesta de estrategias o acciones de infraestructura verde.
Arbolado en entronques.



7.1.3 Estrategias para efectuar la operación y la conservación de la Infraestructura Verde Vial

De acuerdo con el apartado de planeación, en el marco de la mejor implementación de un proyecto de Infraestructura Verde Vial, la mayor integración de los factores (sectores y actores) del proyecto en su fase de planeación y diseño redundará en una obra y operación que atienda la complejidad de manera integral.

En ese sentido, y como se ha mencionado a lo largo de este Manual, la integración de un estudio de costo-beneficio en la fase de planeación del proyecto que prevea los requerimientos desde el diseño, la construcción, la operación, la conservación y el monitoreo, es no sólo necesaria, sino indispensable.

Es sabido que el costo de la infraestructura vial se duplica o cuando menos se incrementa en su fase de operación y conservación, por lo que para el éxito del proyecto, la integración de los costos en la fase de planeación para determinar su viabilidad es estratégica. Asimismo será necesaria para su éxito la incorporación de técnicas, tecnología y ciencia aplicada en la concepción, diseño, construcción, operación, conservación y monitoreo del proyecto; la implementación de esquemas financieros que permitan transitar de manera sustentable; las distintas opciones de gestión y administración desde la perspectiva de la administración pública, la relación y Asociación Público-Privada que ha demostrado ser más eficiente y eficaz en todas las fases de la vida de proyectos de esta naturaleza.

Por otro lado, la diversidad y complejidad de los componentes de la Infraestructura Verde Vial que se integren en el macroproyecto, se deberán de conceptualizar, diseñar y construir con un costo de conservación que se solvete a través de un esquema de financiamiento y que garantice la operación de éste.

Este ejemplo es un caso de unidades de servicios dentro de la infraestructura vial que, a través de un esquema de administración y financiamiento sustentable, ofrecen condiciones de operación óptimas, incorporando los requerimientos de su conservación en el esquema de negocio.

Tabla 7.1
Criterios de conservación para paradores de servicios.

Programa de conservación	Acción requerida	Frecuencia típica
Mantenimiento periódico para todas las estructuras de la Infraestructura Verde Vial.	Verificación del adecuado funcionamiento de las estructuras instaladas.	La que la estructura determine.
Mantenimiento de los servicios.	Verificación de la cobertura y suficiencia de servicios públicos requeridos.	Desde la verificación diaria, hasta periodos semestrales y/o anuales.
Mantenimiento de equipos y maquinaria.	Verificación del estado de los equipos y maquinaria instalada.	

7.1.4 Estrategias para efectuar el monitoreo de la Infraestructura Verde Vial

En alcance a las medidas de monitoreo de los componentes de la Infraestructura Verde Vial planteados en este documento, el éxito del proyecto de Infraestructura Verde Vial en su visión integral será determinado por la cantidad de entes, agentes y actores de distintos sectores involucrados que integren la fase operativa del proyecto.

Se podrían establecer infinidad de indicadores con variables, como los metros cuadrados instalados en el caso estudiado de los paradores. Pero no hay mejor indicador que la continua operación del proyecto y el periodo de tiempo que perdure

funcionando correctamente. En el sentido amplio e integral del proyecto de Infraestructura Verde Vial, su sano desarrollo, así como la implementación de técnicas y de ciencia aplicada bajo un esquema financiero sólido, será el mejor indicador para evaluar el éxito del proyecto.

En el caso de que la Infraestructura Verde Vial no presente un desarrollo como el esperado, se deberá de retomar el esquema planteado en este Manual, específicamente en la fase de Planeación, para así evaluar, dentro del sistema socioambiental en el que se insertó el proyecto, los componentes que no se han incorporado debidamente.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA
DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

ANEXOS

Anexo A

MARCO JURÍDICO NACIONAL E INTERNACIONAL APLICABLE A LA CONSTRUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE.

Marco jurídico e instrumentos en materia de infraestructura verde a nivel nacional.

Instrumentos regulatorios internacionales en materia de infraestructura verde y conservación de los ecosistemas asociados en los que participa México.

Anexo B

CLASIFICACIÓN MORFOMÉTRICA.

Anexo C

CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO DE VARIABLES QUE DETERMINAN SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.

Anexo D

CONSIDERACIONES EN MATERIA DE SUELO.

Unidades de suelo más importantes en el territorio mexicano y su vulnerabilidad a la degradación.

Evaluación de la conductividad hidráulica del suelo bajo condiciones de saturación.

Anexo A**Marco jurídico nacional e internacional aplicable a la construcción de la infraestructura verde.****Marco jurídico e instrumentos en materia de infraestructura verde a nivel nacional**

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM)	5 de febrero de 1917	<p>Artículo 1. En los Estados Unidos Mexicanos todas las personas gozarán de los derechos humanos reconocidos en esta Constitución y en los tratados internacionales de los que el Estado Mexicano sea parte, así como de las garantías para su protección, cuyo ejercicio no podrá restringirse ni suspenderse, salvo en los casos y bajo las condiciones que esta Constitución establece.</p> <p>Artículo 4. [...] Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.</p> <p>Artículo 26. Determina que el Estado organizará el Sistema de Planeación Democrática que imprimirá "...solidez, dinamismo, competitividad, permanencia y equidad al crecimiento de la economía para la independencia y la democratización política, social y cultural de la nación" y dispone que habrá un Plan Nacional de Desarrollo al que se sujetarán obligatoriamente los programas de la Administración Pública Federal.</p> <p>Artículo 27. [...] La Nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana. En consecuencia, se dictarán las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico; para el fraccionamiento de los latifundios; para disponer, en los términos de la ley reglamentaria, la organización y explotación colectiva de los ejidos y comunidades; para el desarrollo de la pequeña propiedad rural; para el fomento de la agricultura, de la ganadería, de la silvicultura y de las demás actividades económicas en el medio rural, y para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que la propiedad pueda sufrir en perjuicio de la sociedad.</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
Ley Orgánica de la Administración Pública Federal	1976	<p>Artículo 1. La presente Ley establece las bases de organización de la Administración Pública Federal, centralizada y paraestatal. A partir de ella, la responsabilidad sobre los asuntos del ambiente y de los recursos naturales en temas que competen a esta Manual, se distribuyó entre la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, las de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, la de Agricultura y Recursos Hidráulicos, la Secretaría de Energía y la de Reforma Agraria.</p>
Ley de Planeación	5 de febrero 1983	<p>Artículo 1. Las disposiciones de esta Ley son de orden público e interés social y tienen por objeto establecer: I.- Las normas y principios básicos conforme a los cuales se llevará a cabo la Planeación Nacional del Desarrollo y encauzar, en función de ésta, las actividades de la administración Pública Federal.</p> <p>Artículo 2. [...] Mandata que la planeación deberá llevarse a cabo como un medio para el eficaz desempeño de la responsabilidad del Estado sobre el desarrollo equitativo, incluyente, integral, sustentable y sostenible del país, con perspectiva de interculturalidad y de género, y deberá tender a la consecución de los fines y objetivos políticos, sociales, culturales, ambientales y económicos contenidos en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.</p> <p>Artículo 3. [...] Define que "...se entiende por planeación nacional la promoción de la actividad económica, social, política, cultural, de protección al ambiente y aprovechamiento racional de los recursos naturales, así como de ordenamiento territorial de los asentamientos humanos y desarrollo urbano".</p> <p>Los artículos 4, 9, 12, 20, 21, 22, 26, 28, 29, 32 y 33 [...] en su conjunto establecen la responsabilidad del Ejecutivo Federal para conducir la planeación nacional del desarrollo a través del Sistema Nacional de Planeación Democrática y la elaboración del Plan Nacional de Desarrollo (PND).</p> <p>Artículo 16, fracción III establece que les corresponde a las dependencias de la Administración Pública Federal "Elaborar los programas sectoriales, considerando las propuestas que, en su caso, presenten las entidades del sector, los órganos constitucionales autónomos, y los gobiernos de las entidades federativas, así como las que deriven de los ejercicios de participación social y de los pueblos y comunidades indígenas interesados."</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	28 de enero de 1988	<p>Reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable.</p> <p>Artículo 3. Para los efectos de esta Ley se entiende por:</p> <p>I.- <i>Ambiente</i>: El conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados.</p> <p>III.- <i>Aprovechamiento sustentable</i>: La utilización de los recursos naturales en forma que se respete la integridad funcional y las capacidades de carga de los ecosistemas de los que forman parte dichos recursos, por periodos indefinidos.</p> <p>IV.- <i>Biodiversidad</i>: La variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otros, los ecosistemas terrestres, marinos y otros ecosistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas.</p> <p>V.- <i>Biotecnología</i>: Toda aplicación tecnológica que utilice recursos biológicos, organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos.</p> <p>V Bis.- <i>Cambio climático</i>: Cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempos comparables.</p> <p>XI.- <i>Desarrollo Sustentable</i>: El proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras.</p> <p>XII.- <i>Desequilibrio ecológico</i>: La alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos.</p> <p>XIII.- <i>Ecosistema</i>: La unidad funcional básica de interacción de los organismos vivos entre sí y de éstos con el ambiente, en un espacio y tiempo determinados.</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
		<p>XIV.- <i>Equilibrio ecológico</i>: La relación de interdependencia entre los elementos que conforman el ambiente que hace posible la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos.</p> <p>XV.- <i>Elemento natural</i>: Los elementos físicos, químicos y biológicos que se presentan en un tiempo y espacio determinado sin la inducción del hombre.</p> <p>XVIII.- <i>Fauna silvestre</i>: Las especies animales que subsisten sujetas a los procesos de selección natural y que se desarrollan libremente, incluyendo sus poblaciones menores que se encuentran bajo control del hombre, así como los animales domésticos que por abandono se tornen salvajes y por ello sean susceptibles de captura y apropiación.</p> <p>XX.- <i>Impacto ambiental</i>: Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.</p> <p>XXV.- <i>Preservación</i>: El conjunto de políticas y medidas para mantener las condiciones que propicien la evolución y continuidad de los ecosistemas y hábitat naturales, así como conservar las poblaciones viables de especies en sus entornos naturales y los componentes de la biodiversidad fuera de sus hábitats naturales.</p> <p>XXVII.- <i>Protección</i>: El conjunto de políticas y medidas para mejorar el ambiente y controlar su deterioro.</p> <p>XXXVI.- <i>Servicios ambientales</i>: los beneficios tangibles e intangibles, generados por los ecosistemas, necesarios para la supervivencia del sistema natural y biológico en su conjunto, y para que proporcionen beneficios al ser humano.</p> <p>XXXVIII.- <i>Educación Ambiental</i>: Proceso de formación dirigido a toda la sociedad, tanto en el ámbito escolar como en el ámbito extraescolar, para facilitar la percepción integrada del ambiente a fin de lograr conductas más racionales a favor del desarrollo social y del ambiente. La educación ambiental comprende la asimilación de conocimientos, la formación de valores, el desarrollo de competencias y conductas con el propósito de garantizar la preservación de la vida.</p> <p>Artículo 15. Para la formulación y conducción de la política ambiental y la expedición de normas oficiales mexicanas y demás instrumentos previstos en esta Ley, en materia de preservación y restauración del equilibrio ecológico y protección al ambiente, el Ejecutivo Federal observará los siguientes principios:</p> <p>I.- Los ecosistemas son patrimonio común de la sociedad y de su equilibrio dependen la vida y las posibilidades productivas del país.</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
		<p>II.- Los ecosistemas y sus elementos deben ser aprovechados de manera que se asegure una productividad óptima y sostenida, compatible con su equilibrio e integridad.</p> <p>III.- Las autoridades y los particulares deben asumir la responsabilidad de la protección del equilibrio ecológico.</p> <p>IV.- Quien realice obras o actividades que afecten o puedan afectar el ambiente, está obligado a prevenir, minimizar o reparar los daños que cause, así como a asumir los costos que dicha afectación implique. Asimismo, debe incentivarse a quien proteja el ambiente, promueva o realice acciones de mitigación y adaptación a los efectos del Cambio Climático y aproveche de manera sustentable los recursos naturales.</p> <p>Artículo 27. Establece los principios de régimen de propiedad y régimen constitucional sobre el cual tendrá lugar el uso y aprovechamiento de los elementos naturales entre ellos las tierras.</p> <p>Artículo 28. La evaluación del impacto ambiental es el procedimiento a través del cual la Secretaría establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el medio ambiente. Para ello, en los casos en que determine el Reglamento que al efecto se expida, quienes pretendan llevar a cabo alguna de las siguientes obras o actividades, requerirán previamente la autorización en materia de impacto ambiental de la Secretaría:</p> <p>I.- Obras hidráulicas, vías generales de comunicación, oleoductos, gasoductos, carboductos y poliductos.</p> <p>Artículo 30. Para obtener la autorización a que se refiere el artículo 28 de esta Ley, los interesados deberán presentar a la Secretaría una manifestación de impacto ambiental, la cual deberá contener, por lo menos, una descripción de los posibles efectos en el o los ecosistemas que pudieran ser afectados por la obra o actividad de que se trate, considerando el conjunto de los elementos que conforman dichos ecosistemas, así como las medidas preventivas, de mitigación y las demás necesarias para evitar y reducir al mínimo los efectos negativos sobre el ambiente.</p> <p>Artículo 36. Para garantizar la sustentabilidad de las actividades económicas, la Secretaría emitirá normas oficiales mexicanas en materia ambiental y para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, que tengan por objeto:</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
		<p>I.- Establecer los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, metas, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en regiones, zonas, cuencas o ecosistemas, en aprovechamiento de recursos naturales, en el desarrollo de actividades económicas, en la producción, uso y destino de bienes, insumos y en procesos.</p> <p>II.- Considerar las condiciones necesarias para el bienestar de la población y la preservación o restauración de los recursos naturales y la protección al ambiente.</p> <p>III.- Estimular o inducir a los agentes económicos para reorientar sus procesos y tecnologías a la protección del ambiente y al desarrollo sustentable.</p> <p>IV.- Otorgar certidumbre a largo plazo a la inversión e inducir a los agentes económicos a asumir los costos de la afectación ambiental que ocasionen.</p> <p>V.- Fomentar actividades productivas en un marco de eficiencia y sustentabilidad.</p> <p>VII.- Proteger los entornos naturales de zonas, monumentos y vestigios arqueológicos, históricos y artísticos, así como zonas turísticas, y otras áreas de importancia para la recreación, la cultura e identidad nacionales y de los pueblos indígenas.</p> <p>Artículo 44. Las zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la Nación ejerce soberanía y jurisdicción, en las que los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano, o que sus ecosistemas y funciones integrales requieren ser preservadas y restauradas, quedarán sujetas al régimen previsto en esta Ley y los demás ordenamientos aplicables.</p> <p>Los propietarios, poseedores o titulares de otros derechos sobre tierras, aguas y bosques comprendidos dentro de áreas naturales protegidas deberán sujetarse a las modalidades que, de conformidad con la presente Ley, establezcan los decretos por los que se constituyan dichas áreas, así como a las demás previsiones contenidas en el programa de manejo y en los programas de ordenamiento ecológico que correspondan.</p> <p>Artículo 79. Para la preservación y aprovechamiento sustentable de la flora y fauna silvestre, se considerarán los siguientes criterios:</p> <p>I.- La preservación y conservación de la biodiversidad y del hábitat natural de las especies de flora y fauna que se encuentran en el territorio nacional y en las zonas donde la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.</p> <p>II.- La continuidad de los procesos evolutivos de las especies de flora y fauna y demás recursos biológicos, destinando áreas representativas de los sistemas ecológicos del país a acciones de preservación e investigación.</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
		<p>III.- La preservación de las especies endémicas, amenazadas, en peligro de extinción o sujetas a protección especial.</p> <p>IV.- El combate al tráfico o apropiación ilegal de especies.</p> <p>V.- El fomento y creación de las estaciones biológicas de rehabilitación y repoblamiento de especies de fauna silvestre;</p> <p>Artículo 87 BIS 2.</p> <p>El Gobierno Federal, las entidades federativas, los Municipios y las demarcaciones territoriales de la Ciudad de México, en el ámbito de sus respectivas competencias, regularán el trato digno y respetuoso que deberá darse a los animales.</p> <p>La regulación sobre trato digno y respetuoso se formulará con base a los siguientes principios básicos:</p> <p>I. Suministrar a los animales agua y alimento suficientes, a efecto de mantenerlos sanos y con una nutrición adecuada.</p> <p>II. Proporcionar a los animales un ambiente adecuado para su descanso, movimiento y estancia, de acuerdo con cada tipo de especie.</p> <p>III. Suministrar a los animales atención médica preventiva y en caso de enfermedad brindar tratamiento médico expedito avalado por un médico veterinario.</p> <p>IV. Permitir a los animales la expresión de su comportamiento natural, y</p> <p>V. Brindar a los animales un trato y condiciones que procuren su cuidado dependiendo de la especie.</p> <p>Asimismo, en el ámbito de sus respectivas competencias, establecerán la prohibición de organizar, inducir o provocar peleas de perros, determinando las sanciones correspondientes. Corresponde al Gobierno Federal expedir las normas oficiales mexicanas que determinen los principios básicos de trato digno y respetuoso previsto por esta Ley, que incluyen condiciones de captura, cautiverio, comercialización, cuarentena, entrenamiento, exhibición, explotación, manutención, transporte, y sacrificio de los animales, así como vigilar su cumplimiento.</p>
Ley General de Vida Silvestre	3 de julio de 2000	<p>Esta Ley es de orden público y de interés social, reglamentaria del párrafo tercero del artículo 27 y de la fracción XXIX, inciso G del artículo 73 constitucionales. Su objeto es establecer la concurrencia del Gobierno Federal, de los gobiernos de los Estados y de los Municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, relativa a la conservación y aprovechamiento sustentable de la vida silvestre y su hábitat en el territorio de la República Mexicana y en las zonas en donde la Nación ejerce su jurisdicción.</p> <p>Artículo 4.</p> <p>Es deber de todos los habitantes del país conservar la vida silvestre; queda prohibido cualquier acto que implique su destrucción, daño o perturbación, en perjuicio de los intereses de la Nación.</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
		<p>Los propietarios o legítimos poseedores de los predios en donde se distribuye la vida silvestre tendrán derechos de aprovechamiento sustentable sobre sus ejemplares, partes y derivados en los términos prescritos en la presente Ley y demás disposiciones aplicables.</p> <p>Los derechos sobre los recursos genéticos estarán sujetos a los tratados internacionales y a las disposiciones sobre la materia.</p> <p>Artículo 5.</p> <p>El objetivo de la política nacional en materia de vida silvestre y su hábitat, es su conservación mediante la protección y la exigencia de niveles óptimos de aprovechamiento sustentable, de modo que simultáneamente se logre mantener y promover la restauración de su diversidad e integridad, así como incrementar el bienestar de los habitantes del país.</p> <p>En la formulación y la conducción de la política nacional en materia de vida silvestre se observarán, por parte de las autoridades competentes, los principios establecidos en el artículo 15 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Además, dichas autoridades deberán prever:</p> <p>I. La conservación de la diversidad genética, así como la protección, restauración y manejo integral de los hábitats naturales, como factores principales para la conservación y recuperación de las especies silvestres.</p> <p>II. Las medidas preventivas para el mantenimiento de las condiciones que propician la evolución, viabilidad y continuidad de los ecosistemas, hábitats y poblaciones en sus entornos naturales.</p> <p>En ningún caso la falta de certeza científica se podrá argumentar como justificación para postergar la adopción de medidas eficaces para la conservación y manejo integral de la vida silvestre y su hábitat.</p> <p>III. La aplicación del conocimiento científico, técnico y tradicional disponibles, como base para el desarrollo de las actividades relacionadas con la conservación y el aprovechamiento sustentable de la vida silvestre.</p> <p>IV. La difusión de la información sobre la importancia de la conservación de la vida silvestre y su hábitat, y sobre las técnicas para su manejo adecuado, así como la promoción de la investigación para conocer su valor ambiental, cultural y económico como bien estratégico para la Nación.</p> <p>V. La participación de los propietarios y legítimos poseedores de los predios en donde se distribuya la vida silvestre, así como de las personas que comparten su hábitat, en la conservación, la restauración y los beneficios derivados del aprovechamiento sustentable.</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
		<p>Artículo 46. La Secretaría coordinará el Sistema Nacional de Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre, el cual se conformará por el conjunto de dichas unidades y tendrá por objeto: b) La formación de corredores biológicos que interconecten las unidades de manejo para la conservación de la vida silvestre entre sí y con las áreas naturales protegidas, de manera tal que se garantice y potencialice el flujo de ejemplares de especies silvestres.</p> <p>Artículo 64. La Secretaría acordará con los propietarios o legítimos poseedores de predios en los que existan hábitats críticos, medidas especiales de manejo, mitigación de impactos y conservación. La realización de cualquier obra pública o privada, así como de aquellas actividades que puedan afectar la protección, recuperación y restablecimiento de los elementos naturales en los hábitats críticos, deberá quedar sujeta a las condiciones que se establezcan como medidas especiales de manejo y conservación en los planes de manejo de que se trate, así como del informe preventivo correspondiente, de conformidad con lo establecido en el reglamento. En todo momento el Ejecutivo Federal podrá imponer limitaciones de los derechos de dominio en los predios que abarquen dicho hábitat, de conformidad con los artículos 1o., fracción X y 2o. de la Ley de Expropiación, con el objeto de dar cumplimiento a las medidas necesarias para su manejo y conservación.</p> <p>Artículo 69. La realización de cualquier obra pública o privada, así como de aquellas actividades que puedan afectar la protección, recuperación y restablecimiento de los elementos naturales en áreas de refugio para proteger especies acuáticas, deberá quedar sujeta a las condiciones que se establezcan como medidas de manejo y conservación en los programas de protección de que se trate, así como del informe preventivo correspondiente, de conformidad con lo establecido en el reglamento.</p> <p>Artículo 106. Sin perjuicio de las demás disposiciones aplicables, toda persona física o moral que ocasione directa o indirectamente un daño a la vida silvestre o a su hábitat, está obligada a repararlo o compensarlo de conformidad a lo dispuesto por la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental. Párrafo reformado DOF 07-06-2013 Los propietarios y legítimos poseedores de los predios, así como los terceros que realicen el aprovechamiento, serán responsables solidarios de los efectos negativos que éste pudiera tener para la conservación de la vida silvestre y su hábitat.</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable	25 de febrero del 2003	<p>Artículo 32. Son criterios obligatorios de política forestal de carácter ambiental y silvícola, los siguientes: XVI. Observar los principios como: biodiversidad, interconectividad, interdependencia, procesos de largo plazo y complejidad.</p> <p>Artículo 143. La Comisión coordinará los esfuerzos y acciones que en materia de investigación, desarrollo, innovación y transferencia tecnológica requiera el sector productivo e industrial forestal del país y, con la opinión de los Consejos que correspondan, proveerá en materia de investigación forestal II. Identificar las áreas y necesidades prioritarias en materia forestal en las que sea necesario apoyar actividades y/o proyectos de investigación, desarrollo, innovación y transferencia tecnológica forestal, siendo sus propósitos fundamentales los siguientes: c) Fomentar la contribución del sector forestal a la economía del país y al crecimiento verde incluyente.</p>
Ley General de Cambio Climático	6 de junio de 2012	<p>Esta ley es de orden público, interés general y observancia en todo el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción y establece disposiciones para enfrentar los efectos adversos del Cambio Climático. Es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de protección al ambiente, desarrollo sustentable, preservación y restauración del equilibrio ecológico.</p> <p>Artículo 2. Esta Ley tiene por objeto: Párrafo reformado DOF 13-07-2018, I. Garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la concurrencia de facultades de la federación, las entidades federativas y los municipios en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al Cambio Climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. II. Regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero para que México contribuya a lograr la estabilización de sus concentraciones en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático considerando, en su caso, lo previsto por el artículo 2o. de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y demás disposiciones derivadas de la misma. III. Regular las acciones para la mitigación y adaptación al Cambio Climático.</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
		<p>IV. Reducir la vulnerabilidad de la población y los ecosistemas del país frente a los efectos adversos del Cambio Climático, así como crear y fortalecer las capacidades nacionales de respuesta al fenómeno.</p> <p>V. Fomentar la educación, investigación, desarrollo y transferencia de tecnología e innovación y difusión en materia de adaptación y mitigación al Cambio Climático.</p> <p>VI. Establecer las bases para la concertación con la sociedad.</p> <p>VII. Promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable, de bajas emisiones de carbono y resiliente a los fenómenos hidrometeorológicos extremos asociados al Cambio Climático, y Fracción reformada DOF 13-07-2018.</p> <p>VIII. Establecer las bases para que México contribuya al cumplimiento del Acuerdo de París, que tiene entre sus objetivos mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2 °C, con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir con los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1.5 °C, con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del Cambio Climático.</p> <p>Artículo 3. Para efectos de esta Ley se entenderá por:</p> <p>I. Acuerdo de París: Convenio adoptado mediante la decisión 1/CP.21 durante el 21er periodo de sesiones de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.</p> <p>II. Adaptación: Medidas y ajustes en sistemas humanos o naturales, como respuesta a estímulos climáticos, proyectados o reales, o sus efectos, que pueden moderar el daño, o aprovechar sus aspectos beneficiosos.</p> <p>III. Atlas de riesgo: Documento dinámico cuyas evaluaciones de riesgo en asentamientos humanos, regiones o zonas geográficas vulnerables, consideran los actuales y futuros escenarios climáticos.</p> <p>VI. Compuestos de efecto invernadero: Gases de efecto invernadero, sus precursores y partículas que absorben y emiten radiación infrarroja en la atmósfera;</p> <p>XIII. Corredores Biológicos: Ruta geográfica que permite el intercambio y migración de las especies de flora y fauna silvestre dentro de uno o más ecosistemas, cuya función es mantener la conectividad de los procesos biológicos para evitar el aislamiento de las poblaciones.</p> <p>XXIII. Gases de efecto invernadero: Aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y emiten radiación infrarroja.</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
		<p>Artículo 30. Las dependencias y entidades de la administración pública federal centralizada y paraestatal, las entidades federativas y los municipios, en el ámbito de sus competencias, implementarán acciones para la adaptación conforme a las disposiciones siguientes:</p> <p>XVII. Desarrollar y ejecutar un programa especial para alcanzar la protección y manejo sustentable de la biodiversidad ante el Cambio Climático, en el marco de la Estrategia Nacional de Biodiversidad. El programa especial tendrá las finalidades siguientes:</p> <p>a) Fomentar la investigación, el conocimiento y registro de impactos del Cambio Climático en los ecosistemas y su biodiversidad, tanto en el territorio nacional como en las zonas en donde la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.</p> <p>b) Establecer medidas de adaptación basadas en la preservación de los ecosistemas, su biodiversidad y los servicios ambientales que proporcionan a la sociedad.</p> <p>XVIII. Fortalecer la resistencia y resiliencia de los ecosistemas terrestres, playas, costas y zona federal marítima terrestre, humedales, manglares, arrecifes, ecosistemas marinos y dulceacuícolas, mediante acciones para la restauración de la integridad y la conectividad ecológicas.</p> <p>Artículo 30. Las dependencias y entidades de la administración pública federal centralizada y paraestatal, las entidades federativas y los municipios, en el ámbito de sus competencias, implementarán acciones para la adaptación conforme a las disposiciones siguientes:</p> <p>b) Establecer medidas de adaptación basadas en la preservación de los ecosistemas, su biodiversidad y los servicios ambientales que proporcionan a la sociedad.</p> <p>Artículo 82. Los recursos para apoyar la implementación de acciones para enfrentar los efectos adversos del Cambio Climático se destinarán a:</p> <p>Acciones para la adaptación al Cambio Climático atendiendo prioritariamente a los grupos sociales ubicados en las zonas más vulnerables del país.</p> <p>II. Proyectos que contribuyan simultáneamente a la mitigación y adaptación al Cambio Climático, incrementando el capital natural, con acciones orientadas, entre otras, a revertir la deforestación y degradación; conservar y restaurar suelos para mejorar la captura de carbono; implementar prácticas agropecuarias sustentables; recargar los mantos acuíferos; preservar la integridad de playas, costas, zona federal marítimo terrestre, terrenos ganados al mar y cualquier otro depósito que se forme con aguas marítimas, humedales y</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
		manglares; promover la conectividad de los ecosistemas a través de corredores biológicos, conservar la vegetación riparia y para aprovechar sustentablemente la biodiversidad; desarrollo y ejecución de acciones de mitigación de emisiones conforme a las prioridades de la Estrategia Nacional, el Programa y los programas de las Entidades Federativas en materia de Cambio Climático; particularmente en proyectos relacionados con eficiencia energética; desarrollo de energías renovables y bioenergéticos de segunda generación; y eliminación o aprovechamiento de emisiones fugitivas de metano y gas asociado a la explotación de los yacimientos minerales de carbón, así como de desarrollo de sistemas de transporte sustentable.
Ley Federal de Responsabilidad Ambiental	7 de junio del 2013	<p>Artículo 13. La reparación de los daños ocasionados al ambiente consistirá en restituir a su Estado Base los hábitats, los ecosistemas, los elementos y recursos naturales, sus condiciones químicas, físicas o biológicas y las relaciones de interacción que se dan entre estos, así como los servicios ambientales que proporcionan, mediante la restauración, restablecimiento, tratamiento, recuperación o remediación. La reparación deberá llevarse a cabo en el lugar en el que fue producido el daño. Los propietarios o poseedores de los inmuebles en los que se haya ocasionado un daño al ambiente deberán permitir su reparación, de conformidad a esta Ley. El incumplimiento a dicha obligación dará lugar a la imposición de medios de apremio y a la responsabilidad penal que corresponda. Los propietarios y poseedores que resulten afectados por las acciones de reparación del daño al ambiente producido por terceros tendrán derecho de repetir respecto a la persona que resulte responsable por los daños y perjuicios que se ocasionen.</p>
Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano	28 de noviembre de 2016	<p>Artículo 53. Para la ejecución de acciones de Mejoramiento y Conservación de los Centros de Población, además de las previsiones señaladas en el artículo anterior, la legislación estatal en la materia establecerá las disposiciones para: XII. La promoción y aplicación de tecnologías factibles y ambientalmente adecuadas para la mayor autosuficiencia, sustentabilidad y protección ambiental, incluyendo la aplicación de azoteas o techos verdes y jardines verticales. Artículo 75. El uso, aprovechamiento y custodia del Espacio Público se sujetará a lo siguiente: V. Se procurará mantener el equilibrio entre las áreas verdes y la construcción de la infraestructura, tomando como base de cálculo las normas nacionales en la materia.</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
		<p>Artículo 101. La Federación, las entidades federativas, los municipios y las Demarcaciones Territoriales, sujetos a disponibilidad presupuestaria, fomentarán la coordinación y la concertación de acciones e inversiones entre los sectores público, social y privado para: XIV. La protección, mejoramiento y ampliación de los espacios públicos de calidad para garantizar el acceso universal a zonas verdes y espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles.</p>
Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio (POEGT)	2012	<p>El Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio será de observancia obligatoria en todo el territorio nacional y vinculará las acciones y programas de la Administración Pública Federal y las entidades paraestatales en el marco del Sistema Nacional de Planeación Democrática. Desarrollo y ejecución de acciones de mitigación de emisiones conforme a las prioridades de la Estrategia Nacional, el Programa y los programas de las Entidades Federativas en materia de Cambio Climático; particularmente en proyectos relacionados con eficiencia energética; desarrollo de energías renovables y bioenergéticos de segunda generación; y eliminación o aprovechamiento de emisiones fugitivas de metano y gas asociado a la explotación de los yacimientos minerales de carbón, así como de desarrollo de sistemas de transporte sustentable.</p>
Programa de Drenaje Pluvial e Infraestructura Verde del Centro de Población de Hermosillo 2018	2018	<p>El objetivo del programa es analizar y determinar la situación hidrológica actual de la ciudad de Hermosillo y las necesidades futuras. Identificar y priorizar las obras hidráulicas necesarias para el manejo adecuado de las aguas pluviales dentro de los siguientes 20 años. Por primera vez este programa incluirá las propuestas de los proyectos de IV, que servirán para la preservación de causas de arroyos, además de determinar, espacios intrínsecos a la naturaleza que puedan convenir en parques urbanos. Esto con la intención de bajar los costos de inversión pública y privada de construir infraestructura gris y al mismo tiempo aprovechar estos lugares para promover la convivencia social, mejorar la salud y mitigar el Cambio Climático.</p>
Norma Técnica que Establece las características y requerimientos para la infraestructura verde en el municipio de Hermosillo	27 septiembre del 2018	<p>Tiene por objeto establecer los requisitos, criterios, lineamientos, especificaciones técnicas y características que permitan dirigir la aplicación, construcción y mantenimientos de las distintas técnicas de IV, tomando en cuenta las mejores prácticas internacionales.</p>

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
Norma Técnica Complementaria al Reglamento de Construcción para el Municipio de Hermosillo que Establece las Características y Requerimientos del Proyecto Arquitectónico.	2018	Artículo 18. Las edificaciones y los predios deberán estar provistos de instalaciones que garanticen el drenaje eficiente de aguas negras y pluviales sujetándose a las siguientes reglas en concordancia con los establecidos en la Norma Técnica Complementaria de IV.
Estrategia de Resiliencia de la Ciudad de México	16 de febrero de 2018	Meta 2.4. Integrar infraestructura verde y azul, y un diseño urbano sensible a la situación hídrica, por medio de intervenciones que mejoren la resiliencia. Meta 3.1. Aumentar la equidad social a nivel espacial a través de programas y proyectos. Acción 3.1.1. Conservar, expandir y recuperar las áreas verdes: Es necesario expandir y recuperar las zonas verdes dentro de la ciudad y promover la inversión en programas como Azoteas Verdes, Programa de Mejora de Imagen Urbana, Programa de Manejo de Barrancas y el Programa de Manejo de las Áreas de Valor Ambiental. Es posible complementar este esfuerzo con iniciativas de educación ambiental que permitan revalorar las áreas verdes, como el Centro de Educación Ambiental, que pueden reforzar la importancia de la IV para la ciudad.
Protección del Clima en la Política Urbana de México (CiClim)	2018	La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH (Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable) busca con el Programa Protección del Clima en la Política Urbana de México (CiClim) mejorar la planeación de las ciudades mexicanas. El programa se ejecuta por encargo del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU) como parte de la Iniciativa Internacional de Protección del Clima (IKI). En coordinación con la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y con los cinco gobiernos locales en Mérida, Hermosillo, Tlaquepaque, León y Morelia trabajamos para fomentar un desarrollo urbano que protege el ambiente y a sus ciudadanos. A partir de este programa se ha generado una hoja de ruta que establece objetivos y calendarios para la implementación de proyectos de infraestructura verde en las ciudades mexicanas.

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos/dictamen
Plan Municipal de Infraestructura Verde 2018-2021 Mérida	2016	El Plan Municipal de infraestructura verde del municipio de Mérida, elaborado en el 2016, fue el primer instrumento de gestión integral de la infraestructura verde en Mérida, para promover la movilidad urbana y la sustentabilidad, a través de una nueva cultura del espacio público. En dicho plan, se establecieron 4 ejes estratégicos y diversas líneas de acción, centradas principalmente en el establecimiento y cuidado de los árboles, como individuos importantes que contribuyen a mejorar la calidad de vida en el Municipio.
Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024		Objetivo prioritario 1: Contribuir al bienestar social mediante la construcción, modernización y conservación de infraestructura carretera accesible, segura, eficiente y sostenible, que conecte a las personas de cualquier condición, con visión de desarrollo regional e intermodal. En materia socioambiental: Liberación del derecho de vía (LDV), proyecto ejecutivo (PE), autorización en materia de impacto ambiental (MIA) y cambio de uso de suelo (CUS), entre otros. Generar una percepción positiva entre la población, respecto a las labores que realiza la SCT (desarrollo de consenso social) para evitar la interferencia de grupos u organizaciones, en la liberación del derecho de vía y los trabajos que se requieren para la ejecución de las obras.
Programa Nacional de Infraestructura Carretera 2018-2024		Se invertirán 10 mil 500 millones de pesos en concluir 22 carreteras útiles y se continuará la construcción y modernización de otras 48 carreteras en 251 kilómetros. Esto permitirá generar 46 mil empleos directos e indirectos.

**Instrumentos regulatorios internacionales
en materia de infraestructura verde y conservación de los ecosistemas
asociados en los que participa México.**

Marco jurídico y/o instrumentos en materia de infraestructura verde	Fecha de publicación	Objetivos /dictamen
Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)	21 de marzo de	Permite, entre otras cosas, reforzar la conciencia pública, a escala mundial, de los problemas relacionados con el Cambio Climático.
Protocolo de Kioto de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	30 de junio de 2005	Compromiso internacional de reducción de emisión de gases efecto invernadero.
El Convenio sobre Diversidad Biológica y las Metas de Aichi	2010	México adoptó en la décima Conferencia de las Partes de la Convención sobre la Diversidad Biológica llevada a cabo en 2010, los compromisos internacionales del Plan Estratégico para la Diversidad Biológica 2011-2020, el cual consiste en un marco de acción global de diez años mediante el cual los países se comprometen a proteger la biodiversidad y mejorar los beneficios que ésta proporciona para el bienestar de las personas.
Acuerdo de París	12 diciembre de 2015	El 12 diciembre de 2015, en la COP21 de París, las Partes de la CMNUCC alcanzaron un acuerdo histórico para combatir el Cambio Climático y acelerar e intensificar las acciones e inversiones necesarias para un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono. Artículo 2. a) Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático; b) Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del Cambio Climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos; y c) Situar los flujos financieros en un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. Artículo 5. 1. Las Partes deberían adoptar medidas para conservar y aumentar, según corresponda, los sumideros y depósitos de gases de efecto invernadero a que se hace referencia en el artículo 4, párrafo 1 d), de la Convención, incluidos los bosques.

Artículo 6.

4. Por el presente se establece un mecanismo para contribuir a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero y apoyar el desarrollo sostenible, que funcionará bajo la autoridad y la orientación de la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Acuerdo y podrá ser utilizado por las Partes a título voluntario. El mecanismo será supervisado por un órgano que designará la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Acuerdo, y tendrá por objeto:

- Promover la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, fomentando al mismo tiempo el desarrollo sostenible;
- Incentivar y facilitar la participación, en la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de las entidades públicas y privadas que cuenten con la autorización de las Partes;
- Contribuir a la reducción de los niveles de emisión en las Partes de acogida, que se beneficiarán de actividades de mitigación por las que se generarán reducciones de las emisiones que podrá utilizar también otra Parte para cumplir con su contribución determinada a nivel nacional; y
- Producir una mitigación global de las emisiones mundiales.

5. Las reducciones de las emisiones que genere el mecanismo a que se refiere el párrafo 4 del presente artículo no deberán utilizarse para demostrar el cumplimiento de la contribución determinada a nivel nacional de la Parte de acogida, si otra Parte las utiliza para demostrar el cumplimiento de su propia contribución determinada a nivel nacional.

8. Las Partes reconocen la importancia de disponer de enfoques no relacionados con el mercado que sean integrados, holísticos y equilibrados y que les ayuden a implementar sus contribuciones determinadas a nivel nacional, en el contexto del desarrollo sostenible y de la erradicación de la pobreza y de manera coordinada y eficaz, entre otras cosas mediante la mitigación, la adaptación, la financiación, la transferencia de tecnología y el fomento de la capacidad, según proceda. Estos enfoques tendrán por objeto:

- Promover la ambición relativa a la mitigación y la adaptación;
- Aumentar la participación de los sectores público y privado en la aplicación de las contribuciones determinadas a nivel nacional; y
- Ofrecer oportunidades para la coordinación de los instrumentos y los arreglos institucionales pertinentes.

Artículo 7.

1. Por el presente, las Partes establecen el objetivo mundial relativo a la adaptación, que consiste en aumentar la capacidad de adaptación, fortalecer la resiliencia y reducir la vulnerabilidad al Cambio Climático con miras a contribuir al desarrollo sostenible y lograr una respuesta de adaptación adecuada en el contexto del objetivo referente a la temperatura que se menciona en el artículo 2.

		<p>5. Las Partes reconocen que la labor de adaptación debería llevarse a cabo mediante un enfoque que deje el control en manos de los países, responda a las cuestiones de género y sea participativo y del todo transparente, tomando en consideración a los grupos, comunidades y ecosistemas vulnerables, y que dicha labor debería basarse e inspirarse en la mejor información científica disponible y, cuando corresponda, en los conocimientos tradicionales, los conocimientos de los pueblos indígenas y los sistemas de conocimientos locales, con miras a integrar la adaptación en las políticas y medidas socioeconómicas y ambientales pertinentes, cuando sea el caso.</p> <p>Artículo 8.</p> <p>1. Las Partes reconocen la importancia de evitar, reducir al mínimo y afrontar las pérdidas y los daños relacionados con los efectos adversos del Cambio Climático, incluidos los fenómenos meteorológicos extremos y los fenómenos de evolución lenta, y la contribución del desarrollo sostenible a la reducción del riesgo de pérdidas y daños.</p>
Agenda 2030	25 de septiembre 2015	<p>El 25 de septiembre de 2015 más de 150 líderes mundiales asistieron a la Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible en Nueva York con el fin de aprobar la Agenda para el Desarrollo Sostenible. El documento final, titulado “Transformar Nuestro Mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”, fue adoptado por los 193 Estados Miembros de las Naciones Unidas. Dicho documento incluye los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible, cuyo objetivo es poner fin a la pobreza, luchar contra la desigualdad y la injusticia, y hacer frente al Cambio Climático sin que nadie quede rezagado para el 2030.</p> <p>Objetivo 6.</p> <p>Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.</p> <p>6.3. De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.</p> <p>6.6. De aquí a 2020, proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.</p> <p>6.b. Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento.</p> <p>Objetivo 7.</p> <p>Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. La energía es el factor que contribuye principalmente al Cambio Climático y representa alrededor del 60% de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero</p> <p>7.1 De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.</p>

		<p>7.b. De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo.</p> <p>Objetivo 9.</p> <p>Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.</p> <p>9.1. Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos.</p> <p>9.4. De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas.</p> <p>Objetivo 11.</p> <p>Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. La rápida urbanización está dando como resultado un número creciente de habitantes en barrios pobres, infraestructuras y servicios inadecuados y sobrecargados (como la recogida de residuos y los sistemas de agua y saneamiento, carreteras y transporte), lo cual está empeorando la contaminación del aire y el crecimiento urbano incontrolado.</p> <p>11.2. De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad</p> <p>11.3. De aquí a 2030, aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos en todos los países.</p> <p>11.5. De aquí a 2030, reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con el agua, y de personas afectadas por ellos, y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres en comparación con el producto interno bruto mundial, haciendo especial hincapié en la protección de los pobres y las personas en situaciones de vulnerabilidad.</p> <p>11.6. De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per capita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo.</p>
--	--	--

		<p>11.7. De aquí a 2030, proporcionar acceso universal a zonas verdes y espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles, en particular para las mujeres y los niños, las personas de edad y las personas con discapacidad</p> <p>11.a. Apoyar los vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales fortaleciendo la planificación del desarrollo nacional y regional</p> <p>11.b. De aquí a 2020, aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del Cambio Climático y la adaptación a él y la resiliencia ante los desastres, y desarrollar y poner en práctica, en consonancia con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, la gestión integral de los riesgos de desastre a todos los niveles.</p> <p>Objetivo 13. Adoptar medidas urgentes para combatir el Cambio Climático y sus efectos.</p> <p>13.1. Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.</p> <p>13.b. Promover mecanismos para aumentar la capacidad para la planificación y gestión eficaces en relación con el Cambio Climático en los países menos adelantados y los pequeños Estados insulares en desarrollo, haciendo particular hincapié en las mujeres, los jóvenes y las comunidades locales y marginadas.</p> <p>Objetivo 15. Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad.</p> <p>15.5. Adoptar medidas urgentes y significativas para reducir la degradación de los hábitats naturales, detener la pérdida de la diversidad biológica y, para 2020, proteger las especies amenazadas y evitar su extinción.</p> <p>15.9. Para 2020, integrar los valores de los ecosistemas y la diversidad biológica en la planificación nacional y local, los procesos de desarrollo, las estrategias de reducción de la pobreza y la contabilidad.</p>
Marco SENDAI	25 de septiembre 2015	<p>El Marco de Sendai, es el instrumento sucesor del Marco de Acción de Hyogo, y garantiza la continuidad del trabajo realizado en relación con este; focalizándose en la gestión del riesgo de desastres, en vez de en la gestión de los desastres, pretende lograr el siguiente resultado en los próximos 15 años: "La reducción sustancial del riesgo de desastres y de las pérdidas ocasionadas por los desastres, tanto en vidas, medios de subsistencia y salud como en bienes económicos, físicos, sociales, culturales y ambientales de las personas, las empresas, las comunidades y los países".</p> <p>Para lograr tal resultado establece un objetivo centrado en evitar nuevos riesgos, reducir el riesgo existente y reforzar la resiliencia:</p>

		<p>"Prevenir la aparición de nuevos riesgos de desastre y reducir los existentes mediante medidas integradas e inclusivas de naturaleza social, económica, jurídica, cultural, educativa, política, ambiental e institucional que prevengan y reduzcan el riesgo y la vulnerabilidad a los desastres, aumenten la preparación para la respuesta y recuperación y refuercen la resiliencia".</p> <p>Para apoyar la evaluación de los avances mundiales en el logro del resultado y del objetivo se han acordado las siguientes 7 metas mundiales.</p> <p>a) Reducir considerablemente la mortalidad mundial causada por desastres. Para 2030, lograr reducir la tasa media de mortalidad mundial por cada 100.000 personas en el decenio 2020-2030 respecto del período 2005-2015;</p> <p>b) Reducir considerablemente el número de personas afectadas a nivel mundial para 2030, y lograr reducir el promedio mundial por cada 100.000 personas en el decenio 2020-2030 respecto del período 2005-2015;</p> <p>c) Reducir las pérdidas económicas causadas directamente por los desastres en relación con el producto interno bruto (PIB) mundial para 2030;</p> <p>d) Reducir considerablemente los daños causados por los desastres en las infraestructuras vitales y la interrupción de los servicios básicos, como las instalaciones de salud y educativas, incluso desarrollando su resiliencia para 2030;</p> <p>e) Incrementar considerablemente el número de países que cuentan con estrategias de reducción del riesgo de desastres a nivel nacional y local para 2020;</p> <p>f) Mejorar considerablemente la cooperación internacional para los países en desarrollo mediante un apoyo adecuado y sostenible que complemente las medidas adoptadas a nivel nacional para la aplicación del presente Marco para 2030;</p> <p>g) Incrementar considerablemente la disponibilidad de los sistemas de alerta temprana sobre amenazas múltiples y de la información y las evaluaciones sobre el riesgo de desastres transmitidas a las personas, y el acceso a ellos, para 2030.</p> <p>Teniendo en cuenta la experiencia adquirida con la aplicación del Marco de Acción de Hyogo, y en aras del resultado esperado y del objetivo, los Estados deben adoptar medidas específicas en todos los sectores, en los planos local, nacional, regional y mundial, con respecto a las siguientes cuatro esferas prioritarias:</p> <p>Prioridad 1: Comprender el riesgo de desastres.</p> <p>23. Las políticas y prácticas para la gestión del riesgo de desastres deben basarse en una comprensión del riesgo de desastres en todas sus dimensiones de vulnerabilidad, capacidad, grado de exposición de personas y bienes, características de las amenazas y entorno. Esos conocimientos se pueden aprovechar para la evaluación del riesgo previo a los desastres, para la prevención y mitigación y para la elaboración y aplicación de medidas adecuadas de preparación y respuesta eficaz para casos de desastre.</p> <p>Prioridad 2: Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo.</p>
--	--	--

	<p>Prioridad 3: Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia.</p> <p>29. Las inversiones públicas y privadas para la prevención y reducción del riesgo de desastres mediante medidas estructurales y no estructurales son esenciales para aumentar la resiliencia económica, social, sanitaria y cultural de las personas, las comunidades, los países y sus bienes, así como del medio ambiente. Estos factores pueden impulsar la innovación, el crecimiento y la creación de empleo. Esas medidas son eficaces en función del costo y fundamentales para salvar vidas, prevenir y reducir las pérdidas y asegurar la recuperación y rehabilitación efectivas.</p> <p>b) Promover mecanismos para transferencia y seguros del riesgo de desastres, distribución y retención de riesgos y protección financiera, como corresponda, para las inversiones tanto públicas como privadas a fin de reducir las consecuencias financieras de los desastres para los gobiernos y las sociedades, en zonas urbanas y rurales;</p> <p>c) Potenciar, como corresponda, las inversiones públicas y privadas para la resiliencia a los desastres, en particular a través de lo siguiente: medidas estructurales, no estructurales y funcionales para la prevención y reducción del riesgo de desastres en instalaciones vitales, en particular escuelas y hospitales e infraestructura física; mejora de la construcción desde el principio para resistir las amenazas mediante técnicas de diseño y construcción adecuadas que incluyan los principios de diseño universal y la normalización de los materiales de construcción; el reforzamiento y la reconstrucción; el fomento de una cultura de mantenimiento; y la toma en consideración de las evaluaciones del impacto económico, social, estructural, tecnológico y ambiental;</p> <p>f) Promover la incorporación de las evaluaciones del riesgo de desastres en la elaboración y aplicación de políticas territoriales, incluidas la planificación urbana, las evaluaciones de la degradación de las tierras y las viviendas informales y no permanentes, y el uso de directrices y herramientas de seguimiento basadas en los cambios demográficos y ambientales previstos;</p> <p>n) Reforzar el uso y la ordenación sostenibles de los ecosistemas y aplicar enfoques integrados de ordenación del medio ambiente y los recursos naturales que incorporen la reducción del riesgo de desastres;</p> <p>Prioridad 4: Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y para “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción</p> <p>c) Promover la resiliencia de la infraestructura vital nueva y existente, incluidas las de abastecimiento de agua, transporte y telecomunicaciones, las instalaciones educativas, los hospitales y otras instalaciones sanitarias, para asegurar que sigan siendo seguras, eficaces y operacionales durante y después de los desastres a fin de prestar servicios esenciales y de salvamento;</p>
--	--

Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024	12 de julio de 2019	<p>Eje General II. Política Social</p> <p>El gobierno de México está comprometido a impulsar el desarrollo sostenible, que en la época presente se ha evidenciado como un factor indispensable del bienestar. Se le define como la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Esta fórmula resume insoslayables mandatos éticos, sociales, ambientales y económicos que deben ser aplicados en el presente para garantizar un futuro mínimamente habitable y armónico. El hacer caso omiso de este paradigma no sólo conduce a la gestación de desequilibrios de toda suerte en el corto plazo, sino que conlleva una severa violación a los derechos de quienes no han nacido.</p> <p>Por ello, el Ejecutivo Federal considerará en toda circunstancia los impactos que tendrán sus políticas y programas en el tejido social, en la ecología y en los horizontes políticos y económicos del país. Además, se guiará por una idea de desarrollo que subsane las injusticias sociales e impulse el crecimiento económico sin provocar afectaciones a la convivencia pacífica, a los lazos de solidaridad, a la diversidad cultural ni al entorno.</p>
Programa Especial de Cambio Climático, denominado PECC 2020-2024	8 de noviembre de 2021	<p>Artículo 1. Se aprueba el Programa Institucional del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático 2020-2024.</p> <p>Artículo 2. El Programa Institucional del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático 2020-2024 será de observancia obligatoria para todas las unidades administrativas de dicha entidad paraestatal, en el ámbito de sus respectivas competencias, y se revisará anualmente para introducir las modificaciones que las circunstancias le impongan.</p> <p>Artículo 3. El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático deberá sujetarse a la Ley de Planeación, al Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 y al Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2020-2024, de conformidad con las disposiciones jurídicas aplicables y elaborará sus respectivos programas y anteproyectos de presupuesto. Éstos últimos deberán destinar los recursos presupuestarios correspondientes para el eficaz cumplimiento de los objetivos y metas del Plan Nacional de Desarrollo, de los programas antes indicados y del propio Programa Institucional del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático 2020-2024.</p> <p>Artículo 4. La Junta de Gobierno del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y el Órgano de Vigilancia correspondiente, en los términos de las disposiciones jurídicas aplicables, darán seguimiento a la implementación de las acciones y estrategias establecidas en el Programa Institucional del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático 2020-2024, reportando los resultados correspondientes.</p>

		<p>Artículo 5. En términos de las disposiciones jurídicas aplicables, la Secretaría de la Función Pública vigilará en el ámbito de su competencia, el cumplimiento de las obligaciones derivadas de las disposiciones contenidas en el presente Acuerdo.</p> <p>Objetivo prioritario 3. Fortalecer las capacidades de los sectores público, privado y social para la atención del Cambio Climático, la protección del ambiente y la ecología.</p>
Acuerdo de Escazú	4 marzo de 2018	<p>Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe.</p> <p>Su objetivo es garantizar la implementación plena y efectiva en los derechos de acceso a la información ambiental, participación pública en aquellos procesos de toma de las decisiones en el entorno ambiental y al acceso a la justicia en el ámbito ambiental, así como la aplicación y el fortalecimiento de las capacidades y la cooperación, garantizando la protección del derecho de cada persona, de las generaciones presentes y futuras, a tener un desarrollo sostenible y a vivir en un medio ambiente sano.</p>

Anexo B Clasificación morfométrica.

Característica morfométrica	Fórmula	Importancia	Servicios ecosistémicos	Clasificación
Desnivel altitudinal (m)	ALT BAJA- ALT ALTA	Es el valor de la diferencia entre la cota más alta de la cuenca y la más baja. Se relaciona con la variabilidad climática y ecológica. Una cuenca con mayor cantidad de pisos altitudinales puede albergar más ecosistemas al presentarse variaciones importantes en su precipitación y temperatura.	Soporte (heterogeneidad ambiental)	448 a 1220 = bajo, 1221 a 1841 = medio y 1841 a 3354 = alto.
Área de la cuenca (km ²)	SWAT	Del área de la cuenca depende el volumen de captación y los escurrimientos que se tengan, así como la magnitud del caudal. Se establecieron tamaños relativos a las mismas cuencas.	Variable usada en otros cálculos.	A menor tamaño, menor capacidad de coleccionar agua y menor volumen de ésta. 7.99 a 18.29 = pequeña, 18.29 a 23.74 = mediana y 23.74 a 44.72 = grande.

Característica morfométrica	Fórmula	Importancia	Servicios ecosistémicos	Clasificación
Pendiente media de la cuenca %	SWAT	Es el promedio de las pendientes de la cuenca, es un parámetro muy importante que determina el tiempo de concentración y su influencia en las máximas crecidas y en el potencial de degradación de la cuenca, sobre todo en terrenos desprotegidos de cobertura vegetal.	Regulación (erosión).	A mayor pendiente mayor velocidad de desplazamiento del agua y erosión y menor tiempo de concentración y menor infiltración. 0 a 5% suave, plano o semiplano 5 a 9% moderada, 9 a 18% fuertemente inclinada y 18 a > escarpada.
Longitud del cauce principal (km)	SWAT	Corriente de mayor longitud, medida desde la parte más alta de la cuenca hasta su salida. Influye en el tiempo de concentración.	Variable usada en otros cálculos.	A mayor longitud (km) mayor concentración. 6.08-8.23 = corto, 8.23.08-11.22 = mediano y 11.22-16.69 = largo.
Pendiente del cauce principal CSI %	SWAT	Es el promedio de las pendientes del cauce principal. Se relaciona directamente con la magnitud del socavamiento o erosión en profundidad y con la capacidad de transporte de sedimentos en suspensión y de arrastre. A mayor pendiente, mayor velocidad de desplazamiento del agua, menor tiempo de concentración y menor infiltración.	Soporte (relacionada con el potencial para retener agua). Regulación (erosión).	A mayor pendiente mayor velocidad de desplazamiento del agua y erosión y menor tiempo de concentración y menor infiltración. 0 a 5% suave, plano o semiplano 5 a 9% moderada, 9 a 18% fuertemente inclinada y 18 a > escarpada.
Factor de forma (Ff) (km ² /km ²)	F=A/L ²	Es la relación entre el área de la cuenca y la longitud del cauce principal. Mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, rápidas y muy intensas a lentas y sostenidas, según su valor de forma tienda a valores extremos grandes y pequeños respectivamente. denota la forma redondeada o alargada de la cuenca.	Soporte (relacionada con el potencial para retener agua).	Valores pequeños crecidas lentas y sostenidas mayor concentración de agua (cuencas redondas). 0.01-0.18 muy poco redonda, 0.19-0.36 ligeramente redonda y 0.36-0.54 moderadamente redonda.

Característica morfológica	Fórmula	Importancia	Servicios ecosistémicos	Clasificación
Coeficiente de masividad (km/Km ²)	Km=altura media de la cuenca/área de la cuenca km ²	Representa la relación entre la altitud media de la cuenca y su superficie. Una cuenca montañosa implica mayor energía y precipitación en general.	Regulación (relacionado con el potencial de erosión).	0 a 35 moderadamente montañosa, 35 a 70 montañosa y 70 a 105 muy montañosa.
Coeficiente orográfico (Co) (km/km ²)	Co=altura media* km o Co=(altmed ²)/área de la cuenca	Complementario de Km se obtiene multiplicando la altura media por el coeficiente de masividad. Este parámetro expresa el potencial de degradación de la cuenca, crece mientras que la altura media del relieve aumenta y la proyección del área de la cuenca disminuye. Así, valores altos son indicativos de gran capacidad erosiva.	Regulación (relacionado con el potencial de erosión).	41104-110000 = bajo, 110000-200000 = medio y 200000-829490 = alto.
Tiempo de concentración Tc (min)	Tc=13.548 (L ² /H) ^{0.77} L=longitud del cauce principal km ² H=diferencia de alturas (m)	Es el tiempo que toma la partícula hidráulicamente más lejana, en viajar hasta el punto emisor.	Provisión y regulación (relacionado con el potencial para abastecer de agua)	A mayor tiempo, mayor volumen de agua. También puede indicar un mayor escurrimiento. 0-41.7 = rápido, 41.6-83.2 = moderado y 83.3-125.1 lento.
Densidad de drenaje Dd (km/km ²)	Dd= L/A L= Longitud total de corrientes en la cuenca A= Área de la cuenca km ²	Este índice permite tener un mejor conocimiento de la complejidad, heterogeneidad espacial y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. En general, una mayor densidad de escurrimientos indica mayor estructuración de la red fluvial, o bien que existe mayor potencial de erosión. Un valor alto de Dd corresponde a grandes volúmenes de escurrimiento, al igual que mayores velocidades de desplazamiento de las aguas, lo que producirá ascensos de las corrientes.	Soporte y regulación (relacionado con la heterogeneidad morfológica y con el agua)	Valores altos indican mayor eficiencia de transporte y mayor velocidad de transporte. 1.234233-1.766551 = baja, 1.766552-2.001283 = media y 2.001284-4.133367 = alta.

Característica morfológica	Fórmula	Importancia	Servicios ecosistémicos	Clasificación
Densidad de drenaje perenne (km/km ²)	DEN_PERNN= longitud corriente perenne/A	Representa la relación entre el área de la cuenca y la longitud de las corrientes perennes.	Soporte (relacionado con el potencial para proveer agua)	A mayor densidad de corrientes perennes, mayor aporte de agua por cuenca. 0 a 0.06 = baja, 0.060 a 0.5 = media y 0.5 a 1.2 = alta.

Fuente: Tomado de Trinidad-Lora, 2021.

Anexo C
Consideraciones para el cálculo de variables que determinan servicios ecosistémicos.

Variable	Cálculo por microcuenca	Importancia	Servicio ecosistémico	Clasificación
Caracterización morfológica	ArcSWAT	Delimitación de cuencas y microcuencas. Ayuda a obtener información de las características de la zona a nivel de microcuenca, considerando rasgos morfológicos que ayudan a inferir sobre los procesos de formación del paisaje y, por lo tanto, sus servicios ecosistémicos.	Soporte y regulación.	Ver Tabla Anexo B Clasificación morfológica.
Análisis de la cobertura vegetal	Índices de vegetación	Mantenimiento de la vida en la tierra, pues de ella, dependen una gran cantidad de Servicios ecosistémicos, sin los cuales la vida no podría existir como la conocemos. Estos servicios incluyen: conservación del suelo, regulación del clima y en mayor escala, la mitigación del Cambio Climático global; la conservación de la biodiversidad y el bienestar social.	Soporte, regulación, provisión y cultural.	El índice se maneja entre 0 y 1, donde 1 indica el máximo potencial, pero esto depende del tipo de vegetación.

Variable	Cálculo por microcuenca	Importancia	Servicio ecosistémico	Clasificación
Variedad de suelo. Variedad geológica. Variedad de tipos de vegetación.	Número de unidades distintas por microcuenca.	Considerando que los diferentes tipos de suelo, vegetación y geología por sí mismos cumplen funciones distintas, dependiendo de sus características.	Heterogeneidad ambiental.	Mayor número de unidades mayor heterogeneidad.
Orientación	OrSur%-OrNorte%	El efecto de ladera modifica las condiciones microclimáticas de los sitios y representa un factor determinante en el desarrollo y la estructura de las comunidades vegetales. En general en el hemisferio norte, las laderas con exposición norte son más húmedas en comparación con aquellas de orientación sur.	Contenido de humedad en los ecosistemas.	
Orientación	Porcentaje de ocupación de cada orientación por microcuenca. (norte, nor-este, nor-oeste, sur, sur-este, sur-oeste, este, oeste y sin inclinación)	Variable geomorfológica que determina heterogeneidad por la complejidad del relieve.	Heterogeneidad ambiental.	Suponiendo una cuenca homogénea en cuanto a orientación, el valor de porcentaje máximo por microcuenca debería ser cercano a 100. Caso contrario, de existir heterogeneidad y suponiendo un caso perfecto donde todas las orientaciones se representarían en igual proporción en una microcuenca, el valor máximo de porcentaje se encontraría alrededor de 11 (resultado de dividir el 100% entre 9 categorías de orientación).

Variable	Cálculo por microcuenca	Importancia	Servicio ecosistémico	Clasificación
Duración del periodo de lluvias DPLL	La DPLL se expresa en meses húmedos consecutivos, iniciando cuando la precipitación pluvial (PP) excede a la evapotranspiración potencial (ETP) (PP > ETP) y finaliza cuando la PP es menor que la ETP (PP < ETP). Este análisis se puede realizar con la metodología propuesta por (Delgado-Carranza 2011).	Esta variable se usó en el cálculo para obtener los sitios de provisión de agua ya que es una variable que contribuye a determinar sitios de mayor disponibilidad de humedad; en el cálculo para determinar sitios de recarga de acuíferos, ya que esta depende también de las zonas con balances hídricos en los que la lluvia supera la ETP, por lo que hay excedentes de precipitación que se convierten en escurrimientos y en el cálculo para determinar la erosión ya que si bien la precipitación es un factor clave para provocar la erosión de los suelos, lo es más la intensidad de lluvia.	Servicios ecosistémicos de soporte y regulación.	Zonas de mayor o menor DPLL por microcuenca.
Riqueza de especies de flora y fauna	Número total de especies que se encuentran en un hábitat, ecosistema, paisaje, área o región determinada (bases de datos espaciales o trabajo de campo).	Esta categoría se usa para determinar la diversidad y complementar a los sitios de gran heterogeneidad ambiental.	Heterogeneidad ambiental y/o diversidad.	Zonas de mayor o menor riqueza y/o diversidad por microcuenca.

Fuente: Tomado de Trinidad-Lora, 2021.

Anexo D
Consideraciones en materia de suelo.

**Unidades de suelo más importantes en el territorio mexicano
y su vulnerabilidad a la degradación.**

Unidad de suelo	Característica	Vulnerabilidad
Leptosol	Muy delgados (espesor < 25 cm), sobre una roca dura.	Poco desarrollo. Pedregosos. Vulnerables a la erosión hídrica.
Regosol	Sobre materiales originales sueltos (o con roca dura a + de 25cm). Muy baja evolución.	Poco profundos, poco desarrollo. Susceptibles a la erosión.
Feozem	Suelos oscuros, ricos en materia orgánica, porosos.	Susceptibles a la erosión hídrica y eólica.
Calcisol	Suelos con acumulaciones de carbonatos.	Elevada concentración de calcio y formación de costras.
Luvisol	Suelos muy desarrollados, arcillas > 30%, profundos.	Sin vegetación pueden llegar a erosionarse con la lluvia.
Vertisol	Alto contenido en arcillas (> 30%). Los cambios de humedad provocan movimientos internos y cambio de volumen.	Suelos con potencial para manejo agrícola.
Cambisol	Suelos con un horizonte cámbico (suelos relativamente jóvenes).	Sin vegetación pueden llegar a erosionarse con la lluvia.
Solonchak	Suelos con un alto contenido en sales solubles.	Vulnerables a la erosión eólica.
Arenosol	Muy arenosos (como mínimo textura arenosa franca). Muy baja evolución.	Vulnerables a la erosión eólica.
Kastañozem	Alto contenido de materia.	Muy vulnerables a la erosión hídrica.
Chernozem	Muy alto contenido de materia orgánica, con carbonatos secundarios en el horizonte inferior.	Muy vulnerables a la erosión hídrica.
Gleysol	Suelos con hidromorfía (por manto freático) permanente (o casi) en los primeros 50 cm.	Inundaciones.
Fluvisol	Formado a partir de materiales flúvicos recientes (o en ríos represados si todavía el material original no ha evolucionado). Cerca de los ríos.	Muy vulnerables a la erosión hídrica.
Andosol	Suelos desarrollados casi siempre a partir de materiales volcánicos piroclásticos.	Muy vulnerables a la erosión hídrica y eólica.

Fuente: SEMARNAT, 2015.

**Evaluación de la conductividad hidráulica del suelo
bajo condiciones de saturación.**

Textura	Densidad aparente		
	Baja	Mediana	Alta
	Conductividad hidráulica (Kf) (cm/día)		
Arena gruesa	> 300	> 300	100-300
Arena media	> 100	> 100	40-100
Arena fina	100-300	40-100	10-40
CA	40-100	10-40	1-10
AC, CRA	100-300	40-100	10-40
L, CL	40-100	10-40	< 1-10
C	100-300	10-100	< 1-10
CRL	40-100	10-40	< 1-10
CR, RA, RL, R	40-300	10-40	< 1-10

(Kf) (cm/día)	< 1	10	40	100	> 300	
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta	Extremadamente alta

Fuente: Tomado de Siebe et al. 2006, adaptado de Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde, 1982.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA
DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adma, M. A., Elmasry, S. S., Ahmed, M. y Ghitas, A. (2017). Practical Investigation for Road Lighting using Renewable Energy Sources. "Sizing and Modelling of Solar/Wind Hybrid System for Road Lighting Application". *Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*, 3(3), 258-266. doi:10.21622/resd.2017.03.3.258
- Álvarez, S. (2017). La implementación de la Infraestructura Verde Urbana como elemento clave para la adaptación al cambio climático en las ciudades de Filadelfia, México y Montreal. Una mirada hacia América del Norte [Tesina de maestría, Université de Scherbrooke]. https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1960/1/100000058335_documento.pdf
- Antillón-Bencomo, N. P. (2019). *Diseño de cunetas que cumplan con el área hidráulica y seguridad vial* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Chihuahua]. <http://repositorio.uach.mx/209/>
- Aparicio, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*, Editorial LIMUSA. http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoren/HIDRO/Fundamentos_de_hidrologia_de_superficie_-_Aparicio.pdf
- Bäckström, M., Viklander, M. y Malmqvist, P.-A. (2006). Transport of stormwater pollutants through a roadside grassed swale. *Urban Water Journal*, 3(2), 55-67. doi:10.1080/15730620600855985
- Baker, A. J. M. y Brooks, R. R. (1989). Terrestrial Higher Plants which Hyperaccumulate Met-Ilic Elements - A Review of their Distribution, Ecology and Phytochemistry. *Biorecovery*, 1: 81-126.
- Balvanera, P., Cotler, H., Aburto-Oropeza, O., Aguilar-Contreras, A., Aguilera-Peña, M., Aluja, M., Andrade-Cetto, A., Arroyo-Quiroz, I., Ashworth, L., Astier, M., Ávila, P., Bitrán-Bitrán, D., Camargo, T., Campo, J., Cárdenas-González, B., Casas, A., Díaz-Fleischer, F., Etchevers, J. D., Ghillardi, A., Zarco, A. (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. En J. Sarukhán, R. Dirzo, R. González e I. March (Eds.), *Capital Natural de México. Volumen II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 185-245). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Banco de Desarrollo de América del Norte [BDAN] (2017). *Manual de Lineamientos de Diseño de Infraestructura Verde para Municipios Mexicanos*. Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza [COCEF]. Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo [IMPLAN]. https://www.nadb.org/uploads/files/1_manual_de_lineamientos_de_diseo_de_infraestructura_verde_2017.pdf

- Barbero, J. A. y Rodríguez-Tornquist, R. (2012). Transporte y cambio climático: hacia un desarrollo sostenible y de bajo carbono. *Revista Transporte y Territorio*, (6), 8-26.
- Barnes J. y Pelletier, J. (2001). *Erosion mapping of the Bolivian Central Andes using the stream power law and a digital elevation model*. Department of Geosciences, University of Arizona.
- Barrett, M. E. (2008). Comparison of BMP Performance Using the International BMP Database. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(5), 556–561. doi:10.1061/(asce)0733-9437(2008)
- Barrett, M. E., Walsh, P. M., Malina Jr, J. F. y Charbeneau, R. J. (1998). Performance of Vegetative Controls for Treating Highway Runoff. *Journal of Environmental Engineering*, 124(11), 1121–1128. doi:10.1061/(asce)0733-9372(1998)
- Barrett, M., Lantin, A. y Austrheim-Smith, S. (2004). Storm Water Pollutant Removal in Roadside Vegetated Buffer Strips. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1890, 129–140. doi:10.3141/1890-16
- Bartens, J. (2009). *Green Infrastructure and Hydrology*. The Mersey Forest. https://www.merseyforest.org.uk/files/GI_&_Hydrology_Report_May_2009.pdf
- Benedict, M. A. y McMahon, E. T. (2002). Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century. *Renewable Resources Journal*, 20(3), 12-17.
- Biao, Z., Wenhua, L., Gaodi, X. y Yu, X. (2010). Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value. *Ecological Economics*, 69(7), 1416–1426. doi:10.1016/j.ecolecon.2008.09.
- Blum, W. E. H. (2005). Functions of Soil for Society and the Environment. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 4(3), 75–79. doi:10.1007/s11157-005-2236-x
- Boege, E. (Ed.) (2008a). *El patrimonio biocultural de los pueblos indígenas de México: hacia la conservación in situ de la biodiversidad y agrobiodiversidad en los territorios indígenas*. Instituto Nacional de Antropología e Historia. Comisión Nacional Para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas.
- Boege, E. (2008b). Regiones, territorio, lenguas y cultura de los pueblos indígenas. En E. Boege (Ed.), *El Patrimonio Biocultural de Los Pueblos Indígenas de México: hacia la conservación in situ de la biodiversidad y agrobiodiversidad en los territorios indígenas* (pp. 48-79). Instituto Nacional de Antropología e Historia. Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas.
- Boege, E. (2009). Retos y perspectivas de conservación en México. En J. Sarukhán, R. Dirzo, R. González e I. March (Eds.), *Capital Natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (p. 49). CONABIO.
- Brander, K. E., Owen, K. E. y Potter, K. W. (2004). Modeled impacts of development type on runoff volume and infiltration performance. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(4), 961–969. doi:10.1111/j.1752-1688.2004.tb0
- Brenna, M., Foiadelli, F. y Kaleybar, H. J. (2020). The Evolution of Railway Power Supply Systems Toward Smart Microgrids: The concept of the energy hub and integration of distributed energy resources. *IEEE Electrification Magazine*, 8(1), 12–23. doi:10.1109/mele.2019.2962886
- Breña, A. F. y Jacobo, M. A. (2006). *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Brown, R. y Amacher, M. (1999). Selecting plant species for ecological restoration: a perspective for land managers. En L. K. Holzworth y R. Brown (Eds.), *Revegetation with native species: Proceedings, 1997 Society for Ecological Restoration annual meeting; 1997 November 12-15* (pp. 1-16). Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Burbery, L. F., Flintoft, M. J. y Close, M. E. (2013). Application of the recirculating tracer well test method to determine nitrate reaction rates in shallow unconfined aquifers. *Journal of Contaminant Hydrology*, 145, 1–9. doi:10.1016/j.jconhyd.2012.11.0
- California Department of Transportation [Caltrans] (2003). *Roadside Vegetated Treatment Sites (RVTS) Study Final Report* (Reporte CTSW-RT-03-028). <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/environmental-analysis/documents/env/ctsw-rt-03-028-a1ly.pdf>
- Carabias, J., y Provencio, E. (2016). Creación y consolidación de capacidades institucionales para la gestión ambiental. En J. Sarukhán e I. Pisanty (Eds.), *Capital Natural de México. Volumen IV: capacidades humanas e institucionales* (pp. 37-49). CONABIO.
- Casas, A., Torres, I., Delgado-Lemus, A., Rangel-Landa, S., Ilesley, C., Torres-Guevara, J., Cruz, A., Parra, F., Moreno-Calles, A. I., Camou, A., Castillo, A., Ayala-Orozco, B., Blancas, J. J., Vallejo, M., Solís, L., Bullen, A., Ortiz, T. y Farfán, B. (2017). Ciencia para la sustentabilidad: investigación, educación y procesos participativos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 113–128. doi:10.1016/j.rmb.2017.10.003
- Castilho, C. S., Hackbart, V. C. S., Pivello, V. R. y dos Santos, R. F. (2015). Evaluating Landscape Connectivity for Puma concolor and Panthera onca Among Atlantic Forest Protected Areas. *Environmental Management*, 55(6), 1377–1389. doi:10.1007/s00267-015-0463-7
- Castillo, V. M. (2004). La Estrategia Temática para la Protección del Suelo: un instrumento para el uso sostenible de los suelos en Europa. *Ecosistemas*, 13(1), 0.
- Challenger, A. y R. Dirzo. (2009). Factores de cambio y estado de la biodiversidad. En J. Sarukhán, R. Dirzo, R. González e I. March (Eds.), *Capital Natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 37-73). México: CONABIO.
- Chan, K. M. A., Shaw, M. R., Cameron, D. R., Underwood, E. C. y Daily, G. C. (2006). Conservation Planning for Ecosystem Services. *PLOS Biology*, 4(11), e379. doi:10.1371/journal.pbio.004037

- Chazdon, R. L. (2008). Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands. *Science*, 320(5882), 1458–1460. doi:10.1126/science.1155365
- Claros-García, C. (2016). *Modelación hidrológica de cunetas verdes. Caso de estudio: Parque San Cristóbal, Bogotá-Colombia* [Tesis de licenciatura, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/15192>
- Clément, G. (2007). Manifiesto del tercer paisaje.
- Comisión Europea [CE] (2013). *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y Al Comité de las Regiones, sobre un marco de seguimiento para la economía circular* (COM/2018/029 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0029&from=ES>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2016). *Consejos de Cuenca*. Gobierno Federal de México. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/consejos-de-cuenca>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Rehabilitación de pozos* (vol. 40). Gobierno Federal de México.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (s.f.). *Guía para Identificación de Actores Clave. Serie: Planeación Hidráulica en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. Gobierno Federal de México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO] (2010). Vacíos y omisiones en la conservación de la biodiversidad acuática epicontinental de México: cuerpos de agua, ríos y humedales. CONABIO. CONANP.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO] (2021). *Enciclovida*. Enciclovida. <https://enciclovida.mx/>
- Corvalán, C., Hales, S., y McMichael, A. (2005). *Ecosistemas y bienestar humano: Síntesis sobre salud. Un informe de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EM)*. Organización Mundial de la Salud. Evaluación de los Ecosistemas del Milenio.
- Cotler, H., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S. y Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica* (83), 5-71.
- De Jong, S. M., Paracchini, M. L., Bertolo, F., Folving, S., Megier, J. y de Roo, A. P. J. (1999). Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data. *CATENA*, 37(3-4), 291–308. doi:10.1016/s0341-8162(99)00038-
- Deletic, A. y Fletcher, T. D. (2006). Performance of grass filters used for stormwater treatment—a field and modelling study. *Journal of Hydrology*, 317(3-4), 261–275. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.05.02
- Díaz-Jaimes, C. A (2020). *Variación en las emisiones contaminantes de los vehículos debido a cambios en la geometría vial en carreteras de Colombia* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78581>
- Dige, G., Liqueste, C., Kleeschulte, S., y Banko, G. (2014). *Spatial analysis of green infrastructure in Europe*. European Environment Agency.
- Dirección General de Servicios Técnicos (2020). *Manual de diseño de pasos para fauna silvestre en carreteras*. SCT. https://www.sct.gob.mx/fileadmin/Direcciones-Grales/DGST/Manuales/Manual_de_Fauna/ManualPasosparaFauna.pdf
- Domenico, P. A. y Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology* (2ª ed.). Wiley.
- Dunnett, N. P., y Hitchmough, J. D. (2004). The Dynamic Landscape: the ecology, design and management of urban naturalistic vegetation. *Londres: E. & FN Spon*.
- Eckart, K., McPhee, Z. y Bolisetti, T. (2017). Performance and implementation of low impact development – A review. *Science of The Total Environment*, 607-608, 413–432. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.06
- Environmental Protection Agency [EPA] (2019). Fast Facts on Transportation Greenhouse Gas Emissions. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/greenvehicles/fast-facts-transportation-greenhouse-gas-emissions>
- European Commission (2016). EU Green Public Procurement Criteria for Road Design, Construction and Maintenance.
- European Commission (2014). Supporting the implementation of the European Green Infrastructure Strategy.
- European Commission y DG Environment (2014). Green Infrastructure and the Transport.
- European Environmental (2011). Green Infrastructure Definitions, 2021. European Environmental Agency.
- Falkenmark, M. (1997). Society's interaction with the water cycle: a conceptual framework for a more holistic approach. *Hydrological Sciences Journal*, 42(4), 451–466. doi:10.1080/02626669709492046
- Farina, W. M., Grüter, C., Acosta, L., y Mc Cabe, S. (2007). Honeybees learn floral odors while receiving nectar from foragers within the hive. *Naturwissenschaften*, 94(1), 55-60. Fetter, C. W. (2001). *Applied hydrogeology* (4a ed.). Prentice Hall.
- Florida Wildlife Corridor. Connecting to keep Florida Wild.
- Follet, R.F., Kimble J.M. y Lal, R. (2000). The potential of U.S. grazing lands to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Lewis Publishers*.
- Forman, R. T. T. y Alexander, L. E. (1998). Roads and their major ecological effects *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29(1), 207–231. doi:10.1146/annurev.ecolsys.29.
- Forman R. T. T., Sperling, D., Bissonette, J. A., Clevenger, A. P., Cutshall, C. D., Dale, V. H., Fahrig, L., France, R. L., Goldman, C. R., Heanue, K., Jones, J., Swanson, F., Turrentine, T. y Winter, T. C. (2003). *Road Ecology: Science and Solutions*. Island Press.
- Freeze, R. A. y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- Fuentes, J. J. A. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro*. Instituto Nacional de Ecología. <https://agua.org.mx/biblioteca/analisis-morfometrico-de-cuencas-caso-de-estudio-del-parque-nacional-pico-de-tancitaro/>

- Gallegos-Tavera, A., Bautista, F. y Álvarez, O. (2014). Software para la evaluación de las funciones ambientales de los suelos (Assofu). *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(2), 237-249. doi:10.5154.r.rchscfa.2012.11.060
- Gallo, J. A. y Greene, R. (2018). *Connectivity Analysis Software for Estimating Linkage Priority* [Software]. Figshare. <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.5673715>
- Geissert, D. (2004). La geomorfología. En S. Guevara, J. Laborde y G. Sánchez-Ríos (Eds.) *Los Tuxtlas: el paisaje de la sierra* (pp. 159-178). Instituto de Ecología.
- Gil-Hernández, P. M., Valladares, F., Fornes-Sales, A. y Gurrutxaga-San Vicente, M. (2017). *Bases científico-técnicas para la Estrategia estatal de IV y de la conectividad y restauración ecológicas*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- Gobierno de Colombia (2020). *Lineamientos de IV vial para Colombia (LIVV)*. World Wildlife Fund [WWF]. Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible. https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/infraestructura_verde_b23_c9_safe_oct2020.pdf
- Gómez, R. A. (2009). *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*. Instituto de Geografía, UNAM.
- González, M. A., Blandón, D., Quiceno, J. A., Giraldo, Á. y Forero, C. (2014). Habitar bajo los puentes: vida y muerte; dos formas de comenzar algo. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 32(2), 36-41.
- González-Méndez, B. y Chávez-García, E. (2020). Re-thinking the Technosol design for greenery systems: Challenges for the provision of ecosystem services in semiarid and arid cities. *Journal of Arid Environments*, 179, 104191. doi:10.1016/j.jaridenv.2020.104
- Grêt-Regamey, A., Walz, A. y Bebi, P. (2008). Valuing Ecosystem Services for Sustainable Landscape Planning in Alpine Regions. *Mountain Research and Development*, 28(2), 156-165. doi:10.1659/mrd.0951
- Grupo de Trabajo sobre la Restauración Ecológica de la UICN-CMAP (2014). *Restauración Ecológica para Áreas Protegidas: principios, directrices y buenas prácticas*. Unión internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).
- Gulf Coast Power Association [GCPA] (1997). *Recommended Specifications for Portland Cement Pervious Pavement*. Georgia Concrete and Products Association.
- Hammersmark, C. T., Rains, M. C. y Mount, J. F. (2008). Quantifying the hydrological effects of stream restoration in a montane meadow, northern California, USA. *River Research and Applications*, 24(6), 735-753. doi:10.1002/rra.1077
- Hatt, B. E., Fletcher, T. D. y Deletic, A. (2007). Stormwater reuse: Designing biofiltration systems for reliable treatment. *Water Science Technology*, 55(4), 201-209. doi:10.2166/wst.2007.110
- Hayashiya, H., Suzuki, T., Kawahara, K. y Yamanoi, T. (2014). Comparative study of investment and efficiency to reduce energy consumption in traction power supply: A present situation of regenerative energy utilization by energy storage system. *2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*. doi:10.1109/epepemc.2014.698057
- Heinz, F. (2019). *Vista aérea de una cuenca de retención de agua de lluvia con carreteras y una gran zona de pradera y una ciudad industrial en el fondo* [Fotografía]. Alamy. <https://www.alamy.es/vista-aerea-de-una-cuenca-de-retencion-de-agua-de-lluvia-con-carreteras-y-una-gran-zona-de-pradera-y-una-ciudad-industrial-en-el-fondo-image240762314.html>
- Heller, N. E. y Zavaleta, E. S. (2009). Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*, 142(1), 14-32. doi:10.1016/j.biocon.2008.10.00
- Hernández-Michaca, J. L., Pisanty-Levy, J., Sánchez-Granados, V. M., Carreón-Méndez, M. A. y Roldán-Ortiz, M. (2000). *Impacto ambiental de proyectos carreteros en escurrimiento del agua superficial* (Publicación técnica 141). Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT].
- Higgins, N., Johnson, P., Gill, L., Bruen, M. y Desta, M. (2008). *Highway Runoff in Ireland and Management with a French Drain System*. Proc. 11th Int. Conf. Urban Drainage, Edinburgh, Scotland.
- Hitchmough, J., y Dunnet, N. (2004). Naturalistic herbaceous vegetation for urban landscapes. En *The dynamic landscape, design, ecology and management of naturalistic urban planting* (pp. 130-183). Spon Press London.
- Hitchmough, J., y Woudstra, J. (1999). The ecology of exotic herbaceous perennials grown in managed, native grassy vegetation in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 45(2-3), 107-121.
- Ignatieva, M. (2010). Design and future of urban biodiversity. *Urban biodiversity and design*, 1.
- IUCN WCPA. Conservation Corridor. World Commission on Protected Areas.
- Iuell, B., Bekker, H., Cuperus, R., Dufek, J., Fry, G., Hicks, C., Hlaváč, V., Keller, V., Rossel, C., Sangwine, T., Tørsløv, N. y Wandall, B. M. (2003). *COST 341, habitat fragmentation due to transportation infrastructure. Wildlife and traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions*. KNNV Publishers.
- Iuell, B. (2005). *Wildlife and Traffic: A European handbook for identifying conflicts and designing solutions*. KNNV Publishers.
- IUSS Working Group WRB (2006). *World Reference Base for Soil Resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication*. World Soil Resources Reports 103. Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. <https://www.fao.org/3/a0510e/a0510e.pdf>
- IUSS Working Group WRB (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Sistema internacional de clasificación de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos*. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos 106. FAO. <https://www.fao.org/3/i3794es/i3794es.pdf>
- Luz, H. (2001). The principle of dominant species. En *Topos*, 37, 16-21
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 19, 41-68.

- Jia, L., Ma, J., Cheng, P. y Yikai, L. (2020). A Perspective on Solar Energy-powered Road and Rail Transportation in China. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 6(4), 760-771. doi:10.17775/CSEEJPES.2020.02040
- Jitsangiam, P., Suwan, T., Kwunjai, S., Rattanasak, U. y Chindaprasirt, P. (2021). Development of alkali activated crushed rock for environmentally sustainable roadway rehabilitation. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1888091>
- Jónsson, J. Ö. G. y Davíðsdóttir, B. (2016). Classification and valuation of soil ecosystem services. *Agricultural Systems*, 145, 24–38. doi:10.1016/j.agsy.2016.02.010
- Karlen, D., Mausbach, M., Doran, J., Cline, R., Harris, R. y Schuman, G. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x
- King, A. W., Johnson, A. R. y O'Neill, R. V. (1991). Transmutation and functional representation of heterogeneous landscapes. *Landscape Ecology*, 5(4), 239–253. doi:10.1007/bf00141438
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362.
- Kokkinopoulos, A., Vokas, G. y Papageorgas, P. (2014). Energy Harvesting Implementing Embedded Piezoelectric Generators – The Potential for the Attiki Odos Traffic Grid. *Energy Procedia*, 50, 1070–1085. doi:10.1016/j.egypro.2014.06.12
- Labib, F. (2001). *Stormwater Management Manual for Western Washington: Volume III -- Hydrologic Analysis and Flow Control Design/BMPs*. Washington Department of Ecology.
- Lampe, L. K. (2004). *Post-project Monitoring of BMP's/SUDS to Determine Performance and Whole-life Costs*. IWA Publishing.
- Ley General de Cambio Climático. *Diario Oficial de la Federación*, 6 de junio de 2012. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_061120.pdf
- Lingfei Qi Peng, Zheng Xiaoping, Wu Wenjun, Duan Lingbo, Li Zutao, Zhang. (2020). A hybrid wind-photovoltaic power generation system based on the foldable umbrella mechanism for applications on highways. *Solar Energy*. 208, 368-378.
- Maass, M. (2003). Principios generales sobre manejo de ecosistemas. En O. L. Enríquez-Sánchez, E. Vega, E. Peters y O. Monroy-Vilchis (Eds.), *Conservación de Ecosistemas Templados de Montaña en México* (pp. 117-136). Instituto Nacional de Ecología.
- Maass, M. y Equihua, M. (2015). Earth stewardship, socioecosystems, the need for a transdisciplinary approach and the role of the International Long Term Ecological Research Network (ILTER). En R. Rozzi, F. S. III Chapin, J. B. Callicott, S. T. A. Pickett, M. E. Power, J. J. Armesto, R. H. May Jr. (Eds.), *Earth stewardship: linking ecology and ethics in theory and practice* (pp. 217-233). Springer.
- Macías, F. (2004). Recuperación de suelos degradados, reutilización de residuos y secuestro de carbono. Una alternativa integral de mejora de la calidad ambiental. *Recursos Rurais* 1, 49-56.
- Macías, F., Bao, M., Macías-García, F. y Camps-Arbestain, M. (2007). Valorización biogeoquímica de residuos por medio de la elaboración de Tecnosoles con diferentes aplicaciones ambientales. *Águas & Resíduos Série III*, 5, 12-25.
- Macías-Cuellar, H., Téllez-Valdés, O., Dávila-Aranda, P. y Casas-Fernández, A. (2006). Los estudios de sustentabilidad. *Ciencias*, 81, 20-31.
- Maes, J., Crossman, N. D. y Burkhard, B. (2016). *Mapping ecosystem services* (pp. 188-204).
- Magaña, V. C. (2014). Eco-driving: ahorro de energía basado en el comportamiento del conductor [Tesis de doctorado, Universidad Carlos III de Madrid]. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/19981>
- Malcom, H. R. (2002). *Hydrologic Design Principles Using Pervious Concrete* [Reporte final]. Unicon Concrete.
- Maliva, R. G. y Missimer, T. M. (2010). *Aquifer storage and recovery and managed aquifer recharge using Wells: planning, hydrogeology, design, and operation*. Schlumberger.
- Martínez, M., Rubio, E. y Palacios, C. (2009). *Terrazas*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Subsecretaría de Desarrollo Rural, Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural. Colegio de Posgraduado.
- McRae, B. H. (2012). *Pinchpoint Mapper Connectivity Analysis Software* [Software]. The Nature Conservancy. <http://www.circuitscape.org/linkagemapper>
- Mell, I. C. (2008). Green infrastructure: concepts and planning. *FORUM-Ejournal*, 8(1), 69-80.
- Mell, I. C. (2010). *Green infrastructure: concepts, perceptions and its use in spatial planning* [Tesis de Doctorado, Newcastle University]. <https://theses.ncl.ac.uk/dspace/handle/10443/914>
- Mendoza-Cázares, E. Y. (2018). Clasificación de tecnologías MAR. En O. Escolero-Fuentes, C. Gutiérrez-Ojeda y E. Y. Mendoza-Cázares (Eds.), *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 81-99). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Millennium Ecosystem Assessment [MA] (2003). *Ecosistemas y bienestar humano: Marco para la evaluación*. Island Press. http://pdf.wri.org/ecosystems_human_wellbeing.pdf
- Millennium Ecosystem Assessment [MA] (2005a). *Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Informe de síntesis. Borrador final*. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.439.aspx.pdf>
- Millennium Ecosystem Assessment [MA] (2005b). *Ecosystems and human well-being: desertification synthesis*. World Resources Institute (WRI). <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.355.aspx.pdf>
- Millennium Ecosystem Assessment [MA] (2005c). *Ecosystems and Human Well-being- Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press.

- Mills, B., y Andrey, J. (2002). Climate Change and Transportation: Potential Interactions and Impacts. *The Potential Impacts of Climate Change on Transportation*, 77, 1-12.
- Minixhofer, P. y Stangl, R. (2021). Green Infrastructures and the Consideration of Their Soil-Related Ecosystem Services in Urban Areas—A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 13(6), 3322. doi:10.3390/su13063322
- Mitas, L. y Mitsova, H. (1998). Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research*, 34(3), 505–516. doi:10.1029/97wr03347
- Morel, J. L., Chenu, C. y Lorenz, K. (2014). Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *Journal of Soils and Sediments*, 15(8), 1659–1666. doi:10.1007/s11368-014-0926-0
- Morgan, R. P. C. (1995). *Soil Erosion and Conservation* (2ª ed.). Longman Scientific and Technical.
- Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D. y Styczen, M. E. (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(6), 527–544. doi:10.1002/(sici)1096-9837(199806)23:6<527:aid-esp868>3.0.co;2-5
- Morrison, D. (2004). A methodology for ecological landscape and planting design—site planning and spatial design. *The Dynamic Landscape: Design, Ecology and Management of Naturalistic Urban Planting*, 150.
- Naciones Unidas (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf
- Naumann, S., Davis, M., Kaphengst, T., Pieterse, M. y Rayment, M. (2011). *Design, implementation and cost elements of Green Infrastructure projects*. Ecologic Institute. GHK Consulting.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de la Federación*, 24 de junio de 1996. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-semarnat-1996.pdf>
- NOM-002-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. *Diario Oficial de la Federación*, 3 de junio de 1998. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
- NOM-003-CONAGUA-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos. *Diario Oficial de la Federación*, 12 de junio de 1996. <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/NOM-003-CONAGUA-1996.pdf>
- NOM-003-SEMARNAT-1997. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. *Diario Oficial de la Federación*, 21 de septiembre de 1998. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
- NOM-014-CONAGUA-2003. Norma Oficial Mexicana, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. *Diario Oficial de la Federación*, 3 de junio de 2008. <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/NOM-014-CONAGUA-2003.pdf>
- NOM-015-CONAGUA-2007. Norma Oficial Mexicana, Infiltración artificial de agua a los acuíferos—Características y especificaciones de las obras y del agua. *Diario Oficial de la Federación*, 25 julio de 2008. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/NOM-015-CONAGUA2007.pdf>
- NOM-079-ECOL-1994. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de los vehículos automotores nuevos en planta y su método de medición. *Diario Oficial de la Federación*, 22 de junio de 1994. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69219.pdf>
- NOM-080-ECOL-1994. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido proveniente del escape de los vehículos automotores, motocicletas y triciclos motorizados en circulación y su método de medición. *Diario Oficial de la Federación*, 22 de junio de 1994. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo68960.pdf>
- NOM-081-ECOL-1994. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición. *Diario Oficial de la Federación*, 22 de junio de 1994. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4706988&fecha=22/06/1994
- NOM-082-ECOL-1994. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las motocicletas y triciclos motorizados nuevos en planta y su método de medición. *Diario Oficial de la Federación*, 22 de junio de 1994. <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/658/1/NOM082SEMARNAT1994.pdf>
- NOM-127-SSA1-1994. Norma Oficial Mexicana, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación*, 16 de diciembre de 1999. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=22/11/2000
- Nortcliff, S. (2002). Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 161–168. doi:10.1016/s0167-8809(01)00253-
- Ordoñez-Díaz, M. M. y Meneses-Silva, L. C. (2015). Criterios e indicadores de sostenibilidad en el subsector vial. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 81-98. doi:10.18359/rcin.1433

- Organización Internacional de Normalización [ISO] (2003). *Calidad del agua. Sensores y equipos de análisis para agua en línea. Especificaciones y ensayos de funcionamiento* (ISO 15839:2003).
- Organización Internacional de Normalización [ISO] (2006). *Calidad del Agua. Muestreo. Parte 11: Guía para el muestreo de aguas subterráneas, o la que la sustituya* (ISO/CD 5667-11-2006).
- Ortiz, O. (2004). Evaluación Hidrológica. *HIDRORED. Red Latinoamericana de Micro Hidroenergía*, 1.
- Paine, J. E. (1992). *Portland Cement Pervious Pavement Construction*. Concrete Construction. The Aberdeen Group.
- Pauleit, S., Fryd, O., Backhaus, A. y Jensen, M. B. (2013). Green Infrastructure and Climate Change. *Sustainable Built Environments*, 224–248. doi:10.1007/978-1-4614-5828-9_2
- Paz-Ferreiro, J., Lu, H., Fu, S., Méndez, A. y Gascó, G. (2014). Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. *Solid Earth*, 5(1), 65–75. doi:10.5194/se-5-65-2014
- Ponsin, V., Coulomb, B., Guelorget, Y., Maier, J. y Höhener, P. (2014). In situ biostimulation of petroleum hydrocarbon degradation by nitrate and phosphate injection using a dipole well configuration. *Journal of Contaminant Hydrology*, 171, 22–31. doi:10.1016/j.jconhyd.2014.10.0
- Prado, B., Mora, L., Abbruzzini, T., Flores, S., Cram, S., Ortega, P., Navarrete, A. y Siebe, C. (2020). Feasibility of urban waste for constructing Technosols for plant growth. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37(3), 237–249. doi:10.22201/cgeo.20072902e.2020.3.1583
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] (2010). *Avances y progreso científicos en nuestro cambiante medio ambiente*. División de Evaluación y Alerta Temprana [DEAT]. <http://www.unep.org/yearbook/2010>
- Puerto-Marchena, A. y Muñoz-Reinoso, J. C. (2010). *Red de conectores ecológicos para el Lince Ibérico en la Sevilla, España*. Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, 1028-1038.
- Quirós-Rodríguez, R. A. (2013). Estudio de pantallas acústicas elaboradas a partir de Green Composites [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/33640?show=full>
- Quiroz-Benítez, D. E. (2018). *Implementación de infraestructura verde como estrategia para la mitigación y adaptación al Cambio Climático en ciudades mexicanas, hoja de ruta*. SEDATU. SEMARNAT. GIZ. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/394115/Hoja_de_ruta_IV_Infraestructura_Verde.pdf
- Ramírez-Hernández, S. G., Pérez-Vázquez, A., García-Albarado, J. C., Gómez-González, A. y de la Cruz-Vargas, M. (2012). Criterios para la selección de especies herbáceas ornamentales para su uso en paisajismo. *Chapingo Serie Horticultura*, 18(1), 71-79.
- Ramírez-Mejía, D., Cuevas, G., y Mendoza, E. (2011). Escenarios de cambio de cobertura y uso de suelo en el Corredor Biológico Mesoamericano-México. UNAM.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K. y Yoder, D. C. (Coords.) (1997). *Prediction of soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. U. S. Department of Agriculture.
- Rubio-Granados, E. y Martínez-Menes, M. R. (s.f.a). *Terrazas de base ancha*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).
- Rubio-Granados, E. y Martínez-Menes, M. R. (s.f.b). *Terrazas de zingg*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).
- Ruiz, E. G., Callejo, S. O., y Verdugo, L. J. (2018). Manual de proyecto geométrico de carreteras 2018.
- Ruiz, L. P. y Trujillano, A. S. (2018). Cambio climático e infraestructuras de transporte por carretera. *Revista Digital del Cedex*, (191), 86-92.
- Saavedra, C. P. y Mannaerts, C. (2003). *Evaluación y monitoreo de modelos de erosión y sedimentación a escala regional usando sensores remotos y SIG. Caso de estudio en la región Andina, Cochabamba, Bolivia*. 3ª Conferencia Latinoamericana Sobre Manejo de Cuencas: “Desarrollo Sostenible en Cuencas”. Aerequipa, Perú.
- Salinas-Prieto, J. A., Colorado-Ruiz, G., Prieto-González, R., Maya-Magaña, E., Rosario de la Cruz, J., Carrillo-Tlazazanatza, H., y Hernández-Acevedo, M (2012). Participación del IMTA en el desarrollo del proyecto de actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional.
- Samberg, A., Wright, C., Spencer, T., Sandler, S. y Pnazarella, I. (2020). *Study of Wind Energy Generation Potential along North Carolina Highways* (Proyecto RP 2019-33). North Carolina Clean Energy Technology Center (NCDOT).
- Sánchez-Bernal, B. y Martínez-Menes, M. R. (s.f.). *Terrazas de banco*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).
- Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Dirzo, R., Llorente-Bousquets, J., Halffter, G., González, R., March, I., Mohar, A., Anta, S. y de la Maza, J. (2009). *Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual y perspectivas de sustentabilidad*. CONABIO. http://centro.paot.org.mx/documentos/conabio/capital_natural.pdf
- Saura, S., Bodin, Ö. y Fortin, M.-J. (2013). Stepping stones are crucial for species' long-distance dispersal and range expansion through habitat networks. *Journal of Applied Ecology*, 51(1), 171–182. doi:10.1111/1365-2664.12179
- Schirmer, M., Leschik, S. y Musolff, A. (2013). Current research in urban hydrogeology – A review. *Advances in Water Resources*, 51, 280–291. doi:10.1016/j.advwatres.2012.06
- Schoenholtz, S., Miegroet, H. V. y Burger, J. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 138(1-3), 335–356. doi:10.1016/s0378-1127(00)00423

- Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT] (1991). *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras*. http://www.sct.gob.mx/normatecaNew/wp-content/uploads/2014/11/SCT_NIS_0487.pdf
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT] (2021). *Estadística Mensual del Sector Comunicaciones y Transportes, junio de 2021*. Dirección General de Planeación [DGP]. http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGP/estadistica/Indicador-Mensual/INDI-2021/CI_Junio_2021.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2015). Suelos. En SEMARNAT (Ed.), *Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015* (pp. 153–190). https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap3_Suelos.pdf
- Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Sauvage, C., Renat, J.-C. y Morel, J. L. (2008). Soil construction: A step for ecological reclamation of derelict lands. *Journal of Soils and Sediments*, 8(2), 130–136. doi:10.1065/jss2008.03.277
- Setälä, H., Bardgett, R. D., Birkhofer, K., Brady, M., Byrne, L., de Ruiter, P. C., de Vries, F. T., Gardi, C., Hedlund, K., Hemerik, L., Hootes, S., Liiri, M., Mortimer, S. R., Pavao-Zuckerman, M., Pouyat, R., Tsiafouli, M. y van der Putten, W. H. (2013). Urban and agricultural soils: conflicts and trade-offs in the optimization of ecosystem services. *Urban Ecosystems*, 17(1), 239–253. doi:10.1007/s11252-013-0311-6
- Siebe, C., Janh, R. y Stahr, K. (1996). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. México: Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C.
- Tennis, P., Leming, M. y Akers, D. (2004). *Pervious concrete pavements*. Portland Cement Association. National Ready Mix Association.
- The Environment Partnership [TEP] (2005). *Advancing the delivery of green infrastructure: targeting issues in England's Northwest*. TEP.
- The National Joint Utilities Group [NJUG] (2007). NJUG Guidelines for the Planning, Installation and Maintenance of Utility Apparatus in Proximity to Trees (vol. 4). NJUG Ltd.
- The World Bank. (23 de julio de 2020). *Solar Photovoltaic Power Potential by Country*. <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/solar-photovoltaic-power-potential-by-country>
- Thornes, J. B. (1985). The Ecology of Erosion. *Geography*, 70(3), 222-235.
- Toronto and Region Conservation Authority [TRCA] (2008). *Performance evaluation of permeable pavement and a bioretention swale*. Sustainable Technologies Evaluation Program (STEP).
- Torres-Zambrano, J. P., Contreras Hernández, A. y González-Amaro, R. M. (s. f.). Las milpas y los árboles. Inecol. <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1245-las-milpas-y-los-arboles>
- Trinidad-Lora, K. (2021). *Las microcuencas como una estrategia de análisis espacial en la identificación de zonas prioritarias para la conservación bajo el enfoque de servicios ecosistémicos, en la Sierra Norte de Oaxaca*. Programa de Maestría en Geografía, UNAM.
- Urbanería (25 de febrero de 2021). *Un placer colaborar con Sociedad de Historia Natural Niparaja EPI México Implan La Paz y H. XVI Ayuntamiento de La Paz* [video adjunto]. Facebook. <https://www.facebook.com/Urbaneria/posts/3651157408286011>
- Valdés, P. y Foulkes, M. D. (2016). La infraestructura verde y su papel en el desarrollo regional. Aplicación a los ejes recreativos y culturales de resistencia y su área metropolitana. *Cuaderno Urbano. Espacio, cultura, sociedad*, 20(20), 45–70.
- Van der Grift, E., Ottburg, F. y Snep, R. (2010). Monitoring wildlife overpass use by amphibians: Do artificially maintained humid conditions enhance crossing rates. En C. L. Irwin, D. Nelson y K. P. McDermott (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Ecology and Transportation. Center for Transportation and the Environment* (pp. 341-347). Raleigh.
- Vázquez-Yanes, C., Batis-Muñoz, A. I., Alcocer-Silva, M. I., Gual-Díaz, M. y Sánchez-Dirzo, C. (1999). *Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y reforestación*. CONABIO. Instituto de Ecología.
- Villalobos, E. C. (2019). *Análisis costo-beneficio de infraestructura verde en cruce de las vialidades Manuel Gómez Morín y Francisco Villareal en Cd. Juárez, Chih. México* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez]. <http://erecursos.uacj.mx/handle/20.500.11961/5703>
- Villón, M. (2004). *Hidrología*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. <http://documents.tips/documents/hidrologia-maximo-villon-bejarpdf.html>
- Watershed Management Group (2012). *Infraestructura verde para comunidades del desierto sonorense*. <http://www.harvestingrainwater.com/wp-content/uploads/2012/01/Infraestructura-Verde-Para-Comunidades-Del-Desierto-Sonorense.pdf>
- Westman, W. E. (1977). How Much Are Nature's Services Worth? *Science*, 197(4307), 960–964. doi:10.1126/science.197.4307.96
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning*. U.S. Department of Agriculture.
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R. y Shaffer, P. (2007). *The SUDS manual (C697)*. CIRIA Publication.
- Woods-Ballard, B., Udale-Clarke, H., Scott, T. y Kellagher, R. (2015). *The SuDS Manual (C753)*. CIRIA Publication. Department for Environment Food and Rural Affairs.
- Worboys, G. L., Ament, R., Day, J. C., Lausche, B., Locke, H., McClure, M., Peterson, C. H., Pittock, J., Tabor, G. y Woodley, S. (Eds.) (2016). *Advanced Draft, Connectivity Conservation Guidelines*. IUCN.

WWF (2021). Guía para el desarrollo de Infraestructura Verde Vial. WWF. <https://www.wwf.org.co/?uNewsID=365979>

Xunta de Galicia (2008). *Instrucción técnica de residuos ITR/01/08, de 8 de enero de 2008, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, referente a la elaboración de suelos (tecnosoles) derivados de residuos. Diario Oficial de Galicia.* https://www.xunta.gal/dog/Publicados/2008/20080125/Anuncio58E2_es.html

Yang, C. T. (1997). *Sediment Transport. Theory and Practice.* McGraw-Hill College.

Yang, H., Zhou, W. y Lou, C. (2009). "Optimal Design And Techno-economic Analysis Of A Hybrid Solar-Wind Power Generation System". *Applied Energy*, 86: (163-169).

GLOSARIO

Acuífero. Formación geológica que almacena agua y que es capaz de transmitir-la de manera que puede ser aprovechada como recurso. El agua de superficie se infiltra a través del suelo hasta encontrarse con una capa impermeable; entonces se acumula y llena los poros y fisuras de las rocas, dando lugar a una zona de saturación. El agua subterránea puede brotar de modo natural (manantiales o fuentes) o ser extraída mediante pozos u otros elementos de captación. Las características fundamentales de un acuífero son la baja velocidad en el movimiento del agua subterránea, los grandes volúmenes de reservas y el gran tiempo de renovación del agua en el sistema.

Acuífero artesiano. Acuífero que, al perforarse, el agua sale a la superficie sin necesidad de elementos externos de bombeo debido a la presión dentro del mismo.

Acuífero confinado. Acuífero limitado en la parte superior por un techo impermeable, de manera que el agua se encuentra a presión superior a la atmosférica en todos los puntos. Cuando una perforación llega al techo del acuífero el agua sube por el tubo hasta que se estabiliza a una profundidad correspondiente a su nivel piezométrico. La recarga de estos acuíferos se produce lateralmente.

Acuífero libre. Acuífero no limitado en su parte superior por una capa impermeable, de manera que existe un nivel freático a una cierta profundidad. Cuando una perforación alcanza este nivel aparece un volumen de agua libre. Estos acuíferos pueden recargarse desde la superficie mediante la infiltración de agua de lluvia, riego, o la existencia de un cuerpo de agua con mayor valor de carga hidráulica.

Acuífero semiconfinado. Acuífero de tipo confinado que se diferencia de éste en que se encuentra limitado en la parte superior por una formación geológica muy poco permeable, pero que es capaz de producir recarga al acuífero (ver acuitardo).

Acuitardo. Formación geológica capaz de almacenar grandes volúmenes de agua, pero que la transmite con dificultad.

Actor. Toda unidad o individuo que forma parte de un grupo, organización, entidad, corporativo o institución del sector público, social, privado, organización no gubernamental o agencia.

Adsorción. Fijación de solutos en la capa límite de agua que rodea la superficie del sólido. Puede tener lugar por diferentes mecanismos en función de la fuerza que atrae el soluto a la superficie del sólido: a) físico, mediante fuerzas de van der Waals; b) electrostático, por una superficie de carga opuesta, y c) de enlace químico.

Aerogenerador. Dispositivo que genera electricidad a partir de la energía cinética del viento.

Agentes de erosión. Conjunto de fuerzas que contribuyen a la destrucción o modificación de la estructura original del relieve o estructuras. Éstas son en su mayoría de origen climático: variaciones de temperatura, insolación, humedad, hielo y deshielo, lluvias y vientos. Existen factores que derivan indirectamente del clima, como la precipitación y el escurrimiento superficial. También son agentes aquéllos que remueven y transportan los materiales consolidados producidos por el intemperismo o por la influencia de la fuerza de gravedad. Los agentes principales son el agua de escurrimiento superficial, el agua subterránea, la nieve, el hielo, el agua de lagos y mar, especialmente el oleaje, el viento, la fauna y los procesos antropogénicos.

Agua capilar. Agua situada en la zona inmediatamente por encima de la superficie piezométrica, transmite la presión hidrostática, llena los poros y está retenida por las fuerzas de capilaridad.

Agua freática. Agua subterránea que fluye o se acumula en la capa más cercana a la superficie. Lo suficientemente próxima a ésta para que sea posible hallarla con pozo ordinario (que supone una profundidad máxima de 30 m y extracción manual del agua). Agua que, por precipitación o infiltración de corrientes de agua, penetra la superficie terrestre.

Agua salada. Agua con más de 30 g de sales disueltas por litro.

Agua salobre. Agua que posee entre 0.5 y 30 g de sales disueltas por litro. Puede resultar de la mezcla de agua dulce con agua de mar, o encontrarse como agua de origen fósil en ciertos acuíferos asociados con rocas salinas.

Aguas abajo. Con relación a un punto o sección de una corriente de agua, se dice que está aguas abajo si un nivel o corriente de agua se sitúa después del punto considerado, avanzando en el sentido de la corriente. Es cualquier punto en la dirección de la corriente en un río o curso de agua posterior a un sitio de referencia.

Aguas arriba. Con relación a un punto o sección de una corriente de agua, se dice que está aguas arriba si un nivel o corriente de agua se sitúa antes del punto considerado, avanzando en sentido contrario al de la corriente. Es cualquier punto de un río o curso de agua anterior a un sitio de referencia.

Amper. Unidad de medida de la intensidad de corriente eléctrica cuyo símbolo es A. Se define como el número de cargas igual a 1 coulomb que pasa por un punto de un material en un segundo. ($1A=1C/s$). Su nombre se debe al físico francés André Marie Ampere.

Antrópico. Producido o modificado por la actividad humana.

Área Natural protegida (ANP). Porciones terrestres o acuáticas del territorio nacional representativas de los diversos ecosistemas, donde el ambiente original no ha sido esencialmente alterado y que producen beneficios ecológicos cada vez más reconocidos y valorados, por lo que corresponden a la superficie terrestre protegida. Se crean mediante decreto presidencial o a través de la certificación de un área cuyos propietarios deciden dedicar a la conservación. La administración y salvaguarda del patrimonio biológico de las ANP federales está a cargo de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP).

Arrancar. Conjunto de operaciones manuales o automáticas para poner en servicio un equipo.

Autoabastecimiento. Es la energía eléctrica destinada a la satisfacción de necesidades propias de personas físicas o morales.

Baterías. Acumulan la energía que reciben de los paneles o turbinas. Cuando hay consumo, la electricidad la proporciona directamente la batería y no los paneles fotovoltaicos o equipos eólicos.

Biocarbón. Es un producto rico en carbono que resulta del calentamiento de biomasa (derivada de plantas o de animales, pero más comúnmente de madera) en un ambiente restringido de oxígeno.

Biodiversidad. La variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otros, los ecosistemas terrestres, marinos, otros ecosistemas acuáticos, y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y entre los ecosistemas.

Biomasa. Toda la materia orgánica susceptible de ser utilizada como fuente de energía.

Biorretención. Proceso en el que los contaminantes y la sedimentación se eliminan de la escorrentía del agua de lluvia.

Bióticos. Son los organismos vivos que influyen en la forma de un ecosistema. Pueden referirse a la flora y a la fauna de un lugar y sus interacciones. Los individuos deben tener comportamiento y características fisiológicas específicas que permitan su supervivencia y su reproducción en un ambiente definido.

Cable. Conductor formado por un conjunto de hilos, ya sea trenzados o torcidos.

Cableado. Circuitos interconectados de forma permanente para llevar a cabo una función específica. Suele hacer referencia al conjunto de cables utilizados para formar una red de área local.

Caja de conexiones. Elemento donde las series de módulos fotovoltaicos son conectados eléctricamente, y donde puede colocarse el dispositivo de protección si es necesario.

Calidad. Es la condición de tensión, frecuencia y forma de onda del servicio de energía eléctrica, suministrada a los usuarios de acuerdo con las normas y reglamentos aplicables.

Canalización. Accesorios metálicos y no metálicos como alambres, cables o barras conductoras expresamente diseñados para contener y proteger contra daños mecánicos. Protegen, asimismo, las instalaciones contra incendios por arco eléctrico producidos por corto circuito.

Capacidad. Medida de la aptitud de un generador, línea de transmisión, banco de transformación, de baterías, o capacitores para generar, transmitir o transformar la potencia eléctrica en un circuito; generalmente se expresa en MW o kW, y puede referirse a un solo elemento, a una central, a un sistema local o bien a un sistema interconectado.

Capacidad de generación. Máxima carga que un sistema de generación puede alimentar bajo condiciones establecidas, por un periodo de tiempo dado.

Capacidad de infiltración. Máxima cantidad de agua que puede absorber un suelo por unidad de tiempo, para unas condiciones iniciales determinadas.

Capacidad de retención. Capacidad que tiene un suelo para retener contaminantes por adsorción.

Capacidad disponible (en un sistema). Suma de las capacidades efectivas de las unidades del sistema que se encuentran en servicio o en posibilidad de dar servicio durante el periodo de tiempo considerado.

Capacidad efectiva. Carga máxima que puede tomar la unidad en las condiciones que prevalecen y corresponde a la capacidad de placa corregida por efecto de degradaciones permanentes en equipos que componen a la unidad y que inhabilitan al generador para producir la potencia nominal.

Capacidad instalada. Potencia nominal o de placa de una unidad generadora, o bien se puede referir a una central, a un sistema local o a un sistema interconectado.

Carga. Cantidad de potencia que debe ser entregada en un punto dado de un sistema eléctrico.

Célula Fotovoltaica. Unidad básica del sistema fotovoltaico donde se produce la transformación de la luz solar en energía eléctrica.

Central eólica. Central generadora que produce energía eléctrica utilizando turbinas que aprovechan la energía cinética del viento.

Central generadora. Lugar y conjunto de instalaciones utilizadas para la producción de energía eléctrica. Dependiendo del medio utilizado para producir dicha energía, recibe el nombre correspondiente.

Círculo. Trayecto o ruta de una corriente eléctrica formado por conductores que transporta energía eléctrica entre fuentes.

Coefficiente de almacenamiento. Volumen de agua que se ha de inyectar por unidad de superficie de un acuífero para que el nivel piezométrico aumente en una unidad. Es un parámetro adimensional. En un acuífero libre su valor es equivalente a la porosidad eficaz. En un acuífero confinado o semiconfinado corresponde a una combinación entre la porosidad, la compresibilidad del agua y la del esqueleto granular del suelo.

Coefficiente de rugosidad de Manning. es un índice que determina la resistencia de un flujo en un canal.

Conductividad hidráulica. Propiedad tensorial del medio que refleja la capacidad del mismo para que el agua circule a través suyo. Una componente direccional de este tensor se define como el caudal que circula a través de una sección unitaria de un acuífero, bajo un gradiente hidráulico unidad. Este parámetro presenta una gran variabilidad natural, de manera que en una formación aparentemente homogénea sus valores pueden variar 3 o 4 órdenes de magnitud. Las dimensiones son (LT⁻¹).

Conservación. La protección, cuidado, manejo y mantenimiento de los ecosistemas, los hábitats, las especies y las poblaciones de la vida silvestre, dentro o fuera de sus entornos naturales, de manera que se salvaguarden las condiciones naturales para su permanencia a largo plazo. // Mantener o cuidar de la permanencia o integridad de algo o de alguien, en este caso, a conservar la infraestructura vial.

Consumo de energía. Potencia eléctrica utilizada por toda o por una parte de una instalación de utilización durante un periodo determinado de tiempo.

Contaminación difusa. Modelo espacial que describe la presencia de un determinado contaminante en un acuífero. Se caracteriza por cubrir extensiones elevadas de territorio, generalmente con una contaminación de baja concentración y relativamente homogénea.

Contaminación lineal. Modelo espacial que describe la presencia de un determinado contaminante en un acuífero. Se caracteriza por cubrir extensiones asimilables a una recta o una curva en el territorio.

Contaminación puntual. Modelo espacial que describe la presencia de un determinado contaminante en un acuífero. Se caracteriza por generar penachos de contaminación de pequeño tamaño.

Control remoto. Control a distancia por medio de señal eléctrica, mecánica, neumática o combinación de éstas.

Controlador de carga. Componente del sistema fotovoltaico que controla el estado de carga de la batería.

Corredor biológico. Espacio geográfico delimitado que proporciona conectividad entre paisajes, ecosistemas y hábitat, naturales o modificados, y asegura el mantenimiento de la diversidad biológica y los procesos ecológicos y evolutivos.

Corredor biológico artificial. Son estructuras ecológicas creadas por el ser humano que tienen el objetivo de mantener la conectividad entre los ecosistemas; los pasos para fauna son un ejemplo de corredor biológico artificial.

Corriente. Movimiento de electricidad por un conductor. // Es el flujo de electrones a través de un conductor. Su intensidad se mide en Amperes (A).

Demanda eléctrica. Requerimiento instantáneo a un sistema eléctrico de potencia normalmente expresado en megawatts (MW) o kilowatts (kW).

Desarrollo sustentable. Entendiéndose como el desarrollo que busca incorporar en el análisis un enfoque ambiental, social, político y económico de común entendimiento entre las partes. Desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

Desequilibrio ecológico. La alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, la transformación y el desarrollo del hombre y demás seres vivos.

Ecosistema. La unidad funcional básica de interacción de los organismos vivos entre sí y de éstos con el ambiente, en un espacio y tiempo determinados.

Edafológico o Edáfico. Relacionado con el estudio de la composición y naturaleza del suelo en su relación con las plantas y el entorno que le rodea.

Energía. La energía es la capacidad de los cuerpos o conjunto de éstos para efectuar un trabajo. Todo cuerpo material que pasa de un estado a otro produce fenómenos físicos que no son otra cosa que manifestaciones de alguna transformación de la energía. // Capacidad de un cuerpo o sistema para realizar un trabajo. La energía eléctrica se mide en kilowatt-hora (kWh).

Energía eólica. La energía cinética que se aprovecha por el movimiento del aire al accionar unas aspas fijas o móviles la cual se transforma en mecánica y acoplada a un turbogenerador se transforma en energía eléctrica; su aprovechamiento va en función de la velocidad del viento y de la tecnología del aerogenerador.

Energía piezoeléctrica. Energía eléctrica que se genera con la vibración de los vehículos, transformando el movimiento en energía eléctrica.

Energía renovable. Energía que utiliza los recursos renovables de la naturaleza, como la biomasa, las radiaciones solares o el viento.

Energía solar. Energía producida por el efecto del calor o radiación del sol. Esta radiación se utiliza para excitar celdas fotovoltaicas que producen electricidad.

Ensayo de bombeo. Prueba que consiste en bombear durante un tiempo determinado en un pozo y recoger los datos de variaciones de nivel piezométrico en una serie de puntos. Esto permite determinar la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento de un acuífero confinado y otros parámetros hidráulicos en otros tipos de acuíferos. El ensayo permite también caracterizar la presencia de contornos hidráulicamente significativos. Los ensayos van seguidos de un periodo de recuperación donde el bombeo ha cesado y los niveles se recuperan hasta su valor de equilibrio.

Ensayo de recuperación. Prueba que se realiza inmediatamente después de un ensayo de bombeo. Consiste en medir los niveles en un punto tras el cese del bombeo y hasta que los niveles se recuperan a su valor de equilibrio.

Equilibrio ecológico. La relación de interdependencia entre los elementos que conforman el ambiente que hace posible la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos.

Equipo. Dispositivo que realiza una función específica utilizado como una parte de, o en conexión con una instalación eléctrica para la operación.

Escorrentía hipodérmica. Fracción de la precipitación que se infiltra, queda a escasa profundidad y vuelve a la superficie alcanzando un curso de agua superficial.

Escorrentía superficial. Fracción de la precipitación que no se infiltra en el terreno y circula por la superficie en forma de torrentes, ríos o arroyos.

Falla. Es una alternación o daño permanente o temporal en cualquier parte del equipo, que varía sus condiciones normales de operación y que generalmente causa un disturbio. // Perturbación que impide la operación normal.

Feral. Se refiere al establecimiento, en el medio silvestre, de poblaciones de especies exóticas que derivaron forzosamente de una condición doméstica.

Flujo laminar. Se llama flujo laminar o movimiento laminar al movimiento de un fluido cuando este es ordenado, estratificado o suave. En un flujo laminar, el fluido se mueve con trayectorias suaves (no sinuosas) y paralelas sin entremezclarse llamadas líneas de corriente. En flujos laminares, el mecanismo de transporte lateral es exclusivamente molecular. En hidrología se entiende como el flujo en donde las características para la aplicación de la Ley de Darcy se cumplen.

Follaje. Conjunto de hojas de los árboles y de otras plantas.

Fotólisis. es la ruptura de enlaces químicos por causa de energía radiante.

Frecuencia. Número de veces que la señal alterna se repite en un segundo. Su unidad de medida es el Hertz (Hz).

Fuentes alternas de energía. Otras fuentes de energía en su forma natural, tales como la eólica, solar, biomasa y mareomotriz.

Gabinete de baja tensión. Envolvente diseñada para proteger y soportar en su interior fusibles limitadores de corriente y demás equipo de baja tensión.

Gabinete de media tensión. Envolvente diseñada para proteger y soportar equipo que alimenta transformadores o servicios de media tensión. Son de tipo modular.

Gases de Efecto Invernadero o GEI. Componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y reemiten radiación infrarroja.

Generación de energía eléctrica. Producción de energía eléctrica por el consumo de alguna otra forma de energía.

Generador. Es el dispositivo electromagnético por medio del cual se convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

Generadores. Son todas aquellas unidades destinadas a la producción de energía eléctrica.

Geomorfología. Corresponde al estudio del relieve de la Tierra, que incluye las formas y estructuras de todas las dimensiones, desde continentes y cuencas oceánicas a estrías y alveolos.

Guarnición. Las guarniciones son los elementos parcialmente enterrados, comúnmente de concreto hidráulico o mampostería, que se emplean principalmente para limitar las banquetas, franjas separadoras centrales, camellones o isletas y delinear la orilla del pavimento. Pueden ser colados en el lugar o precolados.

Hábitat. El sitio específico en un ambiente físico, ocupado por un organismo, por una población, por una especie o por comunidades de especies en un tiempo determinado.

Hertz, H. Un Hertz es la unidad de la frecuencia en las corrientes alternas y en la teoría de las ondas. Es igual a una vibración o a un ciclo por segundo.

Hidrología. es una rama de las ciencias de la Tierra que estudia el agua, su ocurrencia, distribución, circulación y propiedades físicas, químicas y mecánicas en los océanos, atmósfera y superficie terrestre.

Impacto ambiental. Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.

Infiltración. Penetración de agua en el suelo, procedente de la lluvia, cursos superficiales o recarga artificial.

Infraestructura. Conjunto de elementos, dotaciones o servicios necesarios para el buen funcionamiento de un país.

Infraestructura Verde. Red de áreas naturales y seminaturales las características y espacios verdes en áreas rurales, urbanas, terrestres, de agua dulce, costeras y marinas, que en conjunto mejoran la salud y la resiliencia de los ecosistemas, contribuyen a la conservación de la biodiversidad y benefician a las poblaciones humanas a través del mantenimiento y mejora de los servicios de los ecosistemas.

Infraestructura Verde Vial. Conjunto de elementos para el buen funcionamiento de un país diseñados y construidos con enfoque sostenible y relativos a la vía, favoreciendo el aprovechamiento mesurado de los recursos naturales renovables y no renovables, el bienestar de la sociedad y rentabilidad económica.

Instalación. Es la infraestructura creada por el Sector Eléctrico, para la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, así como la de los permisionarios que se interconectan con el sistema.

Interconexión. Es la conexión eléctrica entre dos áreas de control o entre instalación de un permisionario y un área de control.

Interrupción. Es la suspensión del suministro de energía eléctrica debido a causas de fuerza mayor, caso fortuito, a la realización de trabajos de mantenimiento, ampliación o modificación de las instalaciones, a defectos en las instalaciones del usuario, negligencia o culpa del mismo, a la falta de pago oportuno, al uso de energía eléctrica a

través de instalaciones que impidan el funcionamiento normal de los instrumentos de control o de medida, a que las instalaciones del usuario no cumplan con las normas técnicas reglamentarias, el uso de energía eléctrica en condiciones que violen lo establecido en contrato respectivo, cuando no se haya celebrado contrato respectivo, y cuando se haya conectado un servicio sin la autorización de la Comisión a cargo.

Interruptor. Dispositivo electromecánico que abre o cierra circuitos eléctricos y tiene la capacidad de realizarlo en condiciones de corriente nominal o en caso extremo de cortocircuito; su apertura y cierre puede ser de forma automática o manual.

Intrusión marina. Contaminación de un acuífero por entrada de agua del mar. Se produce por cambios en el equilibrio dinámico entre el agua dulce que descarga hacia el mar, combinado con la diferencia de densidad entre el agua dulce y el agua salada.

Inversor. Dispositivo para convertir corriente directa en corriente alterna.

Inyección. Mecanismos de introducción de fluidos en el acuífero. Los dispositivos de inyección se emplean sobre todo en proyectos de recarga artificial de acuíferos o en la introducción de residuos en formaciones permeables profundas.

Joule. Es la unidad de energía que se utiliza para mover un kg masa a lo largo de una distancia de un metro, aplicando una aceleración de un metro por segundo al cuadrado y su abreviatura es J.

Kilowatt. Es un múltiplo de la unidad de medida de la potencia eléctrica y representa 1,000 watts; se abrevia kW.

Kilowatt-hora. Unidad de energía utilizada para registrar los consumos.

Ley de Darcy. Ecuación que relaciona el flujo de agua con el gradiente hidráulico, mediante la conductividad hidráulica.

Líneas de flujo. Líneas que marcan las trayectorias de las partículas de agua. Son perpendiculares a las isopiezas si la conductividad hidráulica es isotropa. Se suelen utilizar para calcular el caudal que circula entre dos isopiezas. Se conocen también como líneas de corriente.

Mantenimiento programado. Conjunto de actividades que se requiere anualmente para inspeccionar y restablecer los equipos que conforman a una unidad generadora. Se programa con suficiente anticipación, generalmente a principios del año, y puede ser atrasado o modificado de acuerdo a las condiciones de operación.

Mantenimiento. Es el conjunto de actividades para conservar las obras e instalaciones en adecuado estado de funcionamiento.

Megadiverso. Es un término que está relacionado con el concepto de biodiversidad y que se refiere a la gran variedad de formas de vida que existen en la Tierra. Un país megadiverso forma parte del selecto grupo de naciones poseedoras de la mayor cantidad y diversidad de especies.

Métodos hidráulicos de barrera. Dispositivos físicos de contención o modificación del flujo subterráneo que permiten, a partir de bombeos, inyecciones o barreras, dirigir o separar masas de agua subterránea, para su confinamiento o tratamiento posterior.

Módulo o panel Fotovoltaico. Es el conjunto formado por las distintas células fotovoltaicas interconectadas, encapsuladas y protegidas por un vidrio en su cara anterior y por un marco por los laterales. El módulo está provisto de terminales para su conexión a la instalación.

Monitoreo. Es el proceso sistemático de recolectar, analizar y utilizar información para hacer seguimiento al progreso de un programa en pos de la consecución de sus objetivos, y para guiar las decisiones de gestión.

Morfopedológico. Análisis del suelo que parte de la premisa de la existencia de unidades geomórficas diferenciables, que con frecuencia corresponden a diferencias en la estructura interna, eventos pedogenéticos anteriores o contactos entre geoformas o cuerpos de sedimentación. Estas unidades son jerárquicas y forman parte de un sistema más amplio en el cual se interrelacionan para influir fuertemente en la formación y caracterización del suelo asociado.

Mulch. Cubierta del terreno formada por paja, hierba cortada o productos sintéticos que se echan al suelo para favorecer la aparición del césped y evitar la erosión.

Nivel dinámico. Nivel piezométrico, cota del agua que tiene un pozo durante el bombeo.

Nivel estático. Nivel piezométrico en un piezómetro o en un pozo en reposo.

Nivel freático. Equivalente a nivel piezométrico para acuíferos libres. En el resto de los tipos de acuíferos no está definido.

Nivel piezométrico. Energía total por unidad de peso del agua subterránea en un punto de un acuífero. La energía total es igual a la suma de la energía potencial más la presión intersticial; la energía cinética puede despreciarse debido a los valores de velocidad bajos habituales en las aguas subterráneas. Se mide en unidades de longitud y es igual a la cota que tendría el agua en un pozo perforado en este punto.

Ohm. Unidad de medida de la resistencia eléctrica. Equivale a la resistencia al paso de la electricidad que produce un material por el cual circula un flujo de corriente de un amperio, cuando está sometido a una diferencia de potencial de un Volt. Su símbolo es Ω .

Operación. Es la aplicación del conjunto organizado de técnicas y procedimientos destinados al uso y funcionamiento adecuado de elementos para cumplir con un objetivo.

Operador. Es el trabajador cuya función principal es la de operar el equipo o sistema a su cargo y vigilar eficaz y constantemente su funcionamiento.

Orientación. Ángulo de orientación respecto al Sur Solar de la superficie de un panel. El Sur geográfico (o real) no debe confundirse con el magnético, que es el que señala la brújula.

Pequeña producción. Es la generación de energía eléctrica de personas físicas o morales destinada totalmente para su venta a la CFE, cuya capacidad total del proyecto en un área determinada no excede de 30 Mw.

Perímetro de protección. Área del territorio alrededor de una captación definida normalmente a partir de criterios de tiempo de tránsito o de ordenación territorial, con el objeto de proteger dicho pozo frente a acciones potencialmente contaminantes.

Permeabilidad. Capacidad de un suelo o roca para que un fluido cualquiera la pueda atravesar. Se mide en (L2), aunque en muchos casos se usa como término cualitativo.

Piezómetro. Sondeo empleado para medir el nivel piezométrico. Suele ser de diámetro pequeño, de manera que no es posible instalar una bomba sumergida en su interior.

Planificación estratégica. Es una herramienta de gestión que permite establecer el quehacer y el camino que se debe recorrer para alcanzar las metas previstas, teniendo en cuenta los cambios y demandas que impone su entorno. En este sentido, es una herramienta fundamental para la toma de decisiones al interior de cualquier análisis. La planeación estratégica es un ejercicio de formulación, establecimiento de objetivos y especialmente de los planes de acción que conducirán a alcanzar estos objetivos.

Planta. Sinónimo de central, estación cuya función consiste en generar energía eléctrica.

Porosidad. En una roca o un suelo es el cociente entre el volumen ocupado por fluidos o gases y el volumen total. Su medida se suele realizar en el laboratorio y en ocasiones se expresa en tanto por ciento.

Porosidad eficaz. Fracción de la porosidad total en la que los poros están interconectados. En un suelo con una buena conexión entre poros la porosidad eficaz y la total son muy similares. Se calcula en el laboratorio o en el campo, y puede variar con las condiciones del ensayo, e incluso en el tiempo, de modo que no es un parámetro bien definido.

Potencia. Es el trabajo o transferencia de energía realizada en la unidad de tiempo. Se mide en Watt (W).

Potencia eléctrica. Tasa de producción, transmisión o utilización de energía eléctrica, generalmente expresada en Watts.

Potencia instalada. Suma de potencias nominales de máquinas de la misma clase (generadores, transformadores, convertidores, motores) en una instalación eléctrica.

Potencia máxima. Valor máximo de la carga que puede ser mantenida durante un tiempo especificado.

Potencia real. Parte de la potencia aparente que produce trabajo. Comercialmente se mide en kW.

Potencia real instalada. Ver capacidad efectiva.

Pozo. Excavación o perforación generalmente de carácter vertical realizada con el objetivo de extraer agua en un acuífero. La perforación permite igualar las presiones entre el acuífero y la atmósfera. El agua entonces sube por la perforación hasta el nivel piezométrico. Cuando se extrae agua del pozo, el acuífero responde intentando reequilibrar las presiones, de manera que cede más agua hacia el pozo. Esto permite la extracción de agua de manera continua.

Preservación. El conjunto de políticas y medidas para mantener las condiciones que propicien la evolución y continuidad de los ecosistemas y hábitat naturales, así como conservar las poblaciones viables de especies en sus entornos naturales y los componentes de la biodiversidad fuera de sus hábitats naturales.

Producción de una central. Energía eléctrica efectivamente generada por una central durante un periodo determinado.

Protección. El conjunto de políticas y medidas para mejorar el ambiente y controlar su deterioro.

Radiación solar. Cantidad de energía procedente del Sol que se recibe en una superficie y tiempo determinados.

Radio de influencia. Máxima distancia en la cual se nota el efecto del bombeo de un pozo.

Recarga. Proceso natural o artificial por el cual se produce la entrada de agua a un acuífero.

Recurso hídrico subterráneo. Fracción de la reserva de un acuífero que puede ser aprovechada de manera sostenible.

Red de flujo. Conjunto formado por las líneas equipotenciales y de flujo que se disponen formando una figura gráfica que se asemeja a una red. Incorporan y permiten identificar las zonas de recarga y descarga. También permiten hacer cálculos de caudales y de tiempo de tránsito entre dos puntos.

Remediación. El conjunto de actividades tendentes a resolver, bajo criterios técnicos y mediante medidas de manejo o control, problemas específicos asociados a ejemplares y poblaciones que se tornen perjudiciales, o bien, a la restauración y recuperación del hábitat de las especies silvestres.

Rendimiento. Es la relación que existe entre la energía que realmente se transforma en energía útil y la que requiere un determinado equipo para su funcionamiento.

Reserva. Totalidad de agua almacenada en un acuífero y que podría movilizarse para su aprovechamiento. Corresponde al producto del volumen instantáneo del acuífero por la porosidad eficaz.

Resiliencia. Capacidad de adaptación de un ser vivo frente a un agente perturbador o un estado o situación adversos. // Capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido.

Resistencia. Cualidad de un material de oponerse al paso de una corriente eléctrica. La resistencia depende de la longitud del conductor, su material, de su sección y de la temperatura del mismo. Las unidades de la resistencia son Ω .

Secuestro de carbono. Capacidad de retener carbono desde la atmósfera hacia el suelo, la vegetación o cuerpos acuáticos.

Servicios ambientales. Aquellos servicios que no provienen directamente de los ecosistemas pero que gracias a las prácticas tecnológicas y antrópicas pueden brindar beneficios al ecosistema.

Servicios ecosistémicos. Son todos los beneficios que los ecosistemas aportan al bienestar humano y social, ya que se obtienen principalmente de los procesos y funciones ecológicas propias de éstos. Además, incluyen las percepciones colectivas de los humanos acerca de su entorno natural y de sus acciones sobre éste, las cuales influyen directamente en la dinámica funcional de los mismos, generan beneficios específicos tanto para las personas y las comunidades que los habitan como para las comunidades y sociedad global en general.

Sistema aislado o remoto. Sistema fotovoltaico autónomo, no conectado a red. Estos sistemas requieren baterías u otras formas de acumulación.

Sistema eléctrico. Instalaciones de generación, transmisión y distribución, físicamente conectadas entre sí, operando como una unidad integral, bajo control, administración y supervisión.

Subestación. Conjunto de aparatos eléctricos localizados en un mismo lugar, y edificaciones necesarias para la conversión o transformación de energía eléctrica; opera el enlace entre dos o más circuitos.

Subsoleo. El subsoleo es la operación que consiste en romper el suelo sin voltearlo ni cambiarlo de posición a profundidades de hasta 80 cm.

Suelo. Cuerpo natural producto de la interacción de material orgánico e inorgánico, modificado por el clima y la actividad biológica en el tiempo. Se ubica en la superficie de la tierra.

Sostenible. En ecología y economía es lo que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar daño grave al ambiente.

Sumidero de carbono. Se conoce como sumidero todo sistema o proceso por el que se extrae de la atmósfera un gas o gases y se almacena. Las formaciones vegetales actúan como sumideros por su función vital principal, la fotosíntesis (proceso por el que los vegetales captan CO_2 de la atmósfera o disuelto en agua y con la ayuda de la

luz solar lo utilizan en la elaboración de moléculas sencillas de azúcares). Mediante esta función los vegetales absorben CO₂ que compensa las pérdidas de este gas que sufren por la respiración y lo que se emite en otros procesos naturales como la descomposición de materia orgánica.

Sustentable. Entendiéndose como el desarrollo que busca incorporar en el análisis un enfoque ambiental, social, político y económico de común entendimiento entre las partes. Es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

Tecnosuelo. Suelos creados por el hombre, se caracterizan porque tienen más del 20% de artefactos en los primeros 100 cm desde la superficie.

Tensión. Potencial eléctrico de un cuerpo. La diferencia de tensión entre dos puntos produce la circulación de corriente eléctrica cuando existe un conductor que los vincula. Se mide en Volt (V) y vulgarmente se le suele llamar voltaje. La tensión de suministro en los hogares de México es de 110 V.

Topografía. es la rama de la ciencia que describe, a nivel físico, la superficie de la Tierra y estudia sus características y accidentes geográficos.

Transdisciplinariedad. Connota una estrategia de investigación que atraviesa límites disciplinarios para crear un enfoque holístico. Se aplica a los esfuerzos de investigación centrados en problemas que cruzan los límites de dos o más disciplinas. Conciernen a lo que se encuentra entre las disciplinas, a través de las diferentes disciplinas y más allá de cada disciplina individual. Su objetivo es la comprensión y uno de los imperativos es la unidad general del conocimiento.

Usuario. Persona física o moral que hace uso de la energía eléctrica proporcionada por el suministrador, previo contrato celebrado por las partes.

Vial. Perteneciente o relativo a la vía.

Volt. Se define como la diferencia de potencial a lo largo de un conductor cuando una corriente de un amper utiliza un Watt de potencia. Unidad del Sistema Internacional.

Volt-ampere (*). Unidad de potencia eléctrica aparente y se abrevia VA.

Watt. Es la unidad que mide potencia. Se abrevia W y su nombre se debe al físico inglés James Watt.

Zona no saturada. Medio parcialmente saturado en agua con aire en los poros. En general hace referencia a la franja de terreno comprendida entre la superficie del terreno y el nivel freático.

Zona saturada. Zona del suelo y las cavidades donde todos los intersticios y las cavidades se encuentran llenas de agua. Se pueden distinguir dos partes según nos encontremos; por debajo del nivel freático la presión del agua supera la presión atmosférica, y por encima la presión del agua es menor que la atmosférica y el agua satura el suelo por capilaridad.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Servicios que ofrecen los ecosistemas y sus vínculos con el bienestar humano.	19
Figura 2 Ejemplo de paneles solares en carreteras de Francia.	21
Figura 3 Ejemplo del uso de paneles solares para la iluminación y suministro de electricidad en carreteras de Italia.	22
Figura 4 Generación de energía eólica y solar en carreteras del Reino Unido.	23
Figura 5 Generación de energía eólica en vías férreas.	23
Figura 6 Esquema de generación de energía piezoeléctrica.	24
Figura 7 Pasos de fauna para vertebrados acuáticos y terrestres.	25
Figura 8 Sistema de biorretención en vialidades.	26
Figura 9 Acotamientos permeables.	28
Figura 10 Construcción del subdren longitudinal.	29
Figura 11 Cuneta verde.	30
Figura 12 Esquema de cuneta y su conformación.	30
Figura 13 Canales secos con presas de control.	31
Figura 14 Cuencas artificiales para retención de agua.	32
Figura 15 Bosque artificial de Uverito, Venezuela, creado para reducir las altas temperaturas y mejorar el paisaje.	33
Figura 16 Tipo de vegetación y su ubicación junto a una vía.	33
Figura 1.1 Concepción multifuncional de la infraestructura verde.	43
Figura 1.2 Elementos que definen o caracterizan a la infraestructura verde.	44
Figura 1.3 Características de la Infraestructura Verde Vial según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Transporte de Colombia.	47
Figura 1.4 Componentes del ciclo hidrológico.	57
Figura 1.5 El ciclo hidrológico de los sistemas de infraestructura natural y urbana. Las flechas que aumentan o disminuyen de tamaño indican un cambio con respecto al ciclo hidrológico anterior. El color de la flecha indica si es parte del ciclo hidrológico natural (azul) o de hidrología urbana (rojo).	58
Figura 1.6 Puente y corredor ecológico en Groene Woud (Holanda).	67

Figura 1.7 La zona húmeda poco después de la construcción, que consiste en una serie de piscinas de margas que se alimentan de agua desde la parte superior del puente natural.	68	Figura 3.2 Barreras de vegetación colocadas a un costado de la carretera para minimizar el ruido y el viento.	145
Figura 1.8 Carretera en la Toscana Italia.	69	Figura 3.3 Esquema de una terraza a declive.	146
Figura 1.9 Carretera en Bélgica.	70	Figura 3.4 Esquema de una terraza a nivel.	147
Figura 1.10 Cuneta húmeda en una calle residencial en Illinois, Estados Unidos de América.	71	Figura 3.5 Esquema de una terraza de base ancha.	148
Figura 2.1 Representación esquemática de: A) Fragmentación de un ecosistema, B) Medida preventiva, C) Medida correctora (pasos para fauna) y D) Medida compensatoria. Se representa en color verde la vegetación propia del ecosistema y en punteado gris la vegetación de borde.	76	Figura 3.6 Esquema de una terraza de bancos alternos.	148
Figura 2.2 Ruta de trabajo para la planeación de la Infraestructura Verde Vial.	78	Figura 3.7 Esquema de una terraza de base angosta.	148
Figura 2.3 A) Corredor potencial identificado, B) Demuestra cómo los primeros tramos del corredor no cumplen con los requerimientos para permear el paso.	88	Figura 3.8 Esquema de una terraza de banco.	149
Figura 2.4 Ejemplo de identificación de barreras ecológicas usando Barrier Mapper. Las zonas en rojo indican áreas donde deberían implementarse planes de restauración ecológica para mejorar la continuidad del corredor.	89	Figura 3.9 Esquema de una terraza de canal amplio.	149
Figura 2.5 Esquema de decisión para Infraestructura Verde Vial basada en energía eólica.	109	Figura 3.10 Ejemplo de estabilización de un corte a partir de terrazas y revegetación con tulias. Autopista México-Tuxpan, tramo Tejocotal-Nuevo Necaxa.	150
Figura 2.6 Mapa de irradiación solar de México.	110	Figura 3.11 La fotografía de arriba muestra una ladera estabilizada al 20% de pendiente con el sistema que incluye dos tipos de plantas en Tlahuitoltepec, Oaxaca. Abajo, un ejemplo de terrazas anchas como sistema de control de erosión en China.	151
Figura 2.7 Esquema de decisión para las instalaciones de Infraestructura Verde Vial basada en energía fotovoltaica.	111	Figura 3.12 Ejemplos de cunetas: A) Cuneta convencional. B) Cuneta verde con diferentes especies vegetales, Seattle, Estados Unidos de América.	152
Figura 2.8 Esquema de la identificación y asociación de actores clave.	119	Figura 3.13 Elementos de una cuneta verde junto a un tramo carretero.	154
Figura 2.9 Ruta de trabajo para la evaluación de servicios ecosistémicos.	122	Figura 3.14 Cuneta seca con césped y plantas perennes.	156
Figura 2.10 Esquema del programa usado en Excel para aplicar las funciones de valor y normalizar las variables. Modelos lineales y no lineales. El ejemplo muestra que los valores óptimos se tienen cuando la capa de entrada vale 100 y se normaliza con el valor 1.	127	Figura 3.15 Cuneta húmeda con césped y plantas resistentes a inundaciones.	157
Figura 2.11 Esquema del programa usado en Excel para aplicar las funciones de valor y normalizar las variables. Modelo en forma de campana. El ejemplo muestra que los valores óptimos se tienen cuando la capa de entrada vale 50 y se normaliza con el valor 1.	128	Figura 3.16 Franja filtrante a un costado de una carretera.	159
Figura 2.12 Esquema metodológico general de las variables y su uso para identificar y evaluar servicios ecosistémicos.	135	Figura 3.17 Jardín microcuenca.	160
Figura 3.1 Campo floreciente a un costado del camino para impulsar la polinización en Dinamarca.	141	Figura 3.18 Esquema de un dren filtrante.	162
		Figura 3.19 Imágenes de humedales pluviales.	165
		Figura 3.20 Cuenca de retención a un costado de la carretera, Qunli, China.	167
		Figura 3.21 Ejemplos de paneles solares instalados en carreteras. A) Sistema de paneles solares instalados con eje paralelo a la carretera. B) Iluminación de una carretera mediante sistema de paneles solares.	172
		Figura 3.22 Turbinas eólicas de eje horizontal y eje vertical.	174
		Figura 3.23 Principales componentes de un sistema eólico.	175
		Figura 3.24 En las fotografías se muestran ejemplos de sistemas eólicos	

que pueden ser instalados en carreteras. A) Turbina eólica savonius horizontal. B) Turbina eólica vertical tipo Darrieus-Savonius mixto (Hi-VAWT DS-1500) en Taiwán.	176
Figura 3.25 Arriba, barrera acústica, Geelong, Australia; abajo, barrera acústica, Ramat Hasharón, Israel.	179
Figura 3.26 Barreras protectoras de sonido en autopista de Suiza. A la izquierda, barrera con montículos de tierra; a la derecha, con láminas de acero.	180
Figura 3.27 Pasos para diversos tipos de fauna en la autopista A50, Holanda.	182
Figura 3.28 Influencia de la urbanización en el % de drenaje natural.	184
Figura 3.29 Pavimento permeable: etapas de filtración.	186
Figura 3.30 Condición de espacios subutilizados en los bajo puentes de las ciudades.	193
Figura 3.31 Skatepark en bajo puente, Celaya, México.	194
Figura 4.1 Ejemplos de paleta vegetal a utilizar en zonas donde se busca una continuidad ecológica regional.	201
Figura 4.2 Ejemplo de diseño de la cubierta vegetal en la Infraestructura Verde Vial considerando distintos estratos.	205
Figura 4.3 Criterios para considerar al estimar las medidas de una terraza.	210
Figura 4.4 Esquemas de construcción de la sección transversal de una terraza y la utilización de materiales (de préstamo y/o de corte) como relleno de acuerdo con la condición del suelo .	211
Figura 4.5 Elementos geométricos de la sección transversal de una terraza.	212
Figura 4.6 Ejemplo de diseño de vegetación en terraza.	214
Figura 4.7 Esquema general de una cuneta.	219
Figura 4.8 Elementos de una cuneta verde tipo seca.	222
Figura 4.9 Imagen de una cuneta verde tipo seca y el manejo del uso de suelo y la vegetación.	223
Figura 4.10 Esquema de una cuneta verde tipo húmeda.	224
Figura 4.11 Imagen de una cuneta verde tipo húmeda. A la izquierda se muestra una mezcla de suelo mejorado para lograr la retención mientras que en la imagen derecha se observa un suelo nativo de tipo arcilloso.	225
Figura 4.12 Consideraciones hidráulicas para el diseño de una franja filtrante.	228

Figura 4.13 Esquema de una franja filtrante.	229
Figura 4.14 Ejemplo de diseño de vegetación en jardín microcuenca.	231
Figura 4.15 Esquema de un dren filtrante.	233
Figura 4.16 Humedal y su perfil de suelo.	236
Figura 4.17 Diseño de un biorretenedor de contaminantes.	239
Figura 4.18 Áreas de una cuenca de retención.	243
Figura 4.19 Diseño típico de pozo filtrante.	249
Figura 4.20 Diseño típico de pozo filtrante.	250
Figura 4.21 En la imagen del lado izquierdo se observa una celda solar monocristalina y del lado derecho se tiene una celda solar policristalina.	252
Figura 4.22 Diagrama de conexiones de un sistema fotovoltaico con respaldo de baterías.	254
Figura 4.23 Diagrama de diseño de la colocación de paneles solares en la infraestructura vial.	254
Figura 4.24 Velocidad de operación de diversas tecnologías eólicas.	255
Figura 4.25 Diagrama de diseño de la colocación de las turbinas eólicas en la infraestructura vial.	258
Figura 4.26 Pantalla acústica de tierra.	259
Figura 4.27 Pantalla de concreto con fibras de madera.	260
Figura 4.28 Pantalla acústica de metal perforado.	261
Figura 4.29 Pantalla acústica de madera.	262
Figura 4.30 Pantalla acústica transparente.	263
Figura 4.31 Matriz de tipos de estructuras que pueden ser utilizadas por cada grupo de fauna dependiendo de su forma de vida y tipo de vegetación en la que se realice el proyecto de infraestructura lineal.	265
Figura 4.32 Sección transversal típica de un pavimento de concreto permeable. Cuando la subrasante del pavimento está nivelada completamente horizontal, las diferentes capas proveen almacenamiento de agua pluvial: concreto permeable superficial (15% a 25% volumen de huecos vacíos), la subbase del pavimento (20% a 40% volumen de huecos vacíos), y sobre la superficie hasta la altura de la banquetta (100% volumen de huecos vacíos).	268

Figura 4.33 Ejemplos de sección transversal de diferentes configuraciones de drenaje para usarse sobre suelos impermeables: a) trinchera rellena con roca por debajo del pavimento; b) trinchera de roca a lo largo de la orilla del pavimento; c) trinchera en V; d) trinchera rellena de roca que se extiende hacia afuera del pavimento; e) subdrenaje de arena; f) subdrenaje de arena con trinchera rellena de roca.	270
Figura 4.34 Planos de elevación y de altura de una instalación inclinada.	271
Figura 4.35 El concreto permeable se coloca primero y después se empareja la superficie con allanadora vibratoria.	272
Figura 4.36 Concreto permeable después de emparejarlo (izquierda) y después de compactarlo (derecha).	273
Figura 4.37 Rodillo usado para hacer juntas, comúnmente llamado <i>pizza cutter</i> .	274
Figura 4.38 Instalación de pliegos o láminas de plástico para cubrir el concreto permeable dentro de los primeros minutos después de su consolidación, para así evitar pérdida de agua por evaporación.	275
Figura 4.39 Fotografía de zonas mineras restauradas con suelos artificiales a partir de residuos mineros.	276
Figura 4.40 Diseño de actividades lúdicas y recreativas para aprovechar el espacio. Taman Park, en Bandung, Indonesia.	282
Figura 4.41 Diseño de bajo puente para actividades deportivas. Skatepark en el Centro de Vancouver, Canadá.	282
Figura 4.42 Diseño arquitectónico de graffiti en bajo puente.	283
Figura 4.43 Corredor utilizado como espacio comunitario para peatones y ciclistas. Propuesta para la autopista Rockaway Queens, Nueva York.	283
Figura 4.44 Esquema general de un diseño de Infraestructura Verde Vial aplicado en carreteras.	286
Figura 5.1 Maquinaria necesaria para la construcción de suelos artificiales.	312
Figura 6.1 Determinación de pH de las muestras de suelo natural y suelos artificiales.	327
Figura 6.2 Ejemplos de penetrómetros para evaluar la compactación del suelo.	328
Figura 6.3 Esquema para toma de muestras de densidad aparente de los suelos.	329
Figura 7.1 Dinámica de aprovechamiento del espacio en la carretera federal México-Querétaro 57D a través del tiempo.	333

Figura 7.2 Propuesta de aglomeración de construcciones dentro del Parador Turístico San Pedro 2020.	335
Figura 7.3 Propuesta de reorganización de flujos. Parador Turístico San Pedro.	336
Figura 7.4 Propuesta de conjunto. Parador Turístico San Pedro.	336
Figura 7.5 Propuesta de estrategias y componentes de una Infraestructura Verde Vial en el Parador Turístico San José. Plano de conjunto.	337
Figura 7.6 Propuesta de estrategias o acciones de infraestructura verde en las diferentes secciones de una carretera.	339
Figura 7.7 Propuesta de estrategias o acciones de infraestructura verde. Arbolado en entronques.	343

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Unidades de suelo más importantes en el territorio mexicano y su vulnerabilidad a la degradación.	55
Tabla 1.2 Áreas de oportunidad en México para la implementación de la Infraestructura Verde Vial.	73
Tabla 2.1 Secuencia lógica de procesos que se deben llevar a cabo para obtener una primera caracterización de la condición ambiental del área de estudio. Información de entrada en gabinete.	82
Tabla 2.2 Secuencia lógica de procesos que se deben llevar a cabo para obtener una primera caracterización de la condición ambiental del área de estudio. Información de entrada en campo.	85
Tabla 2.3 Criterios metodológicos para evaluar la vegetación.	91
Tabla 2.4 Indicadores físicos, químicos y biológicos de calidad del suelo.	97
Tabla 2.5 Criterios para generar propuestas de manejo de suelos para la construcción de Infraestructura Verde Vial.	101
Tabla 2.6 Información necesaria para evaluar el sistema hidrológico y las fuentes de obtención del recurso.	106
Tabla 2.7 Información para evaluar e identificar los servicios ecosistémicos en el área de estudio.	123
Tabla 2.8 Funciones de valor usadas en el proceso de normalización de las variables.	126
Tabla 2.9 Ejemplo de matriz para priorización de microcuencas.	130

Tabla 3.1 Elementos que componen una instalación eólica de pequeña potencia.	175	Tabla 5.5 Requisitos de operación y conservación para estanques y humedales.	299
Tabla 3.2 Comparación de las propuestas para ahorrar combustible.	190	Tabla 5.6 Requisitos de operación y conservación de las cuencas de retención.	301
Tabla 3.3 Síntesis de tipos de componentes de la Infraestructura Verde Vial y los servicios que proveen.	196	Tabla 5.7 Requisitos de operación y conservación de los pozos de infiltración.	303
Tabla 4.1 Matriz de valoración de criterios para la selección de plantas con potencial ornamental para uso en paisajismo.	207	Tabla 5.8 Principales funciones en la ingeniería de operaciones para sistemas de energía renovable.	304
Tabla 4.2 Mediciones utilizadas para el espaciamiento entre terrazas.	209	Tabla 5.9 Actividades de conservación típicas para superficies de concreto permeable.	311
Tabla 4.3 Dimensiones de la sección transversal de las terrazas de formación sucesiva y la capacidad de almacenamiento de agua.	213	Tabla 5.10 Requisitos de operación para la construcción de tecnosuelos.	313
Tabla 4.4 Guía para estimar la velocidad del agua.	216	Tabla 6.1 Método de evaluación de la vegetación en la Infraestructura Verde Vial.	317
Tabla 4.5 Para el coeficiente se puede obtener un valor en función del tipo de suelo, su uso y su pendiente.	217	Tabla 6.2 Relación entre los valores de densidad aparente de los suelos basada en la textura.	329
Tabla 4.6 Análisis del lugar donde se pondrá la cuneta.	218	Tabla 6.3 Requisitos de conservación para la construcción de tecnosuelos.	330
Tabla 4.7 Características relevantes para el diseño de cunetas verdes.	220	Tabla 7.1 Criterios de conservación para paradores de servicios.	344
Tabla 4.8 Criterios de diseño de las franjas filtrantes.	226		
Tabla 4.9 Requisitos de la WDOE para la caracterización del subsuelo en instalaciones de infiltración.	237		
Tabla 4.10 Límites y métodos de prueba para los principales contaminantes de agua en pozos de infiltración.	248		
Tabla 4.11 Clasificación de energías eólicas de pequeña potencia.	256		
Tabla 4.12 Rangos típicos* para calcular las proporciones de materiales del concreto permeable**.	266		
Tabla 4.13 Síntesis de los requerimientos de diseño y construcción de los diferentes componentes que pueden conformar la Infraestructura Verde Vial.	285		
Tabla 5.1 Requisitos de operación y conservación de sistemas de terrazas.	293		
Tabla 5.2 Resumen de los requisitos de operación y conservación para cunetas verdes.	294		
Tabla 5.3 Requisitos de funcionamiento y conservación de las franjas filtrantes.	296		
Tabla 5.4 Requisitos de operación y conservación para los drenes filtrantes.	298		

**MANUAL DE PLANEACIÓN,
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE
INFRAESTRUCTURA VERDE VIAL**

Primera edición. Se terminó de imprimir en el mes de diciembre de 2021 en *Grupo Atril, excelencia editorial y digital*. Av. Real de los Reyes, núm. 207-11, Col. Los Reyes, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04330. Tel. 55-1517-8736. Correo electrónico: atrileditorial@yahoo.com. El tiro constó de 25 ejemplares. La edición estuvo a cargo de la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes.



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES