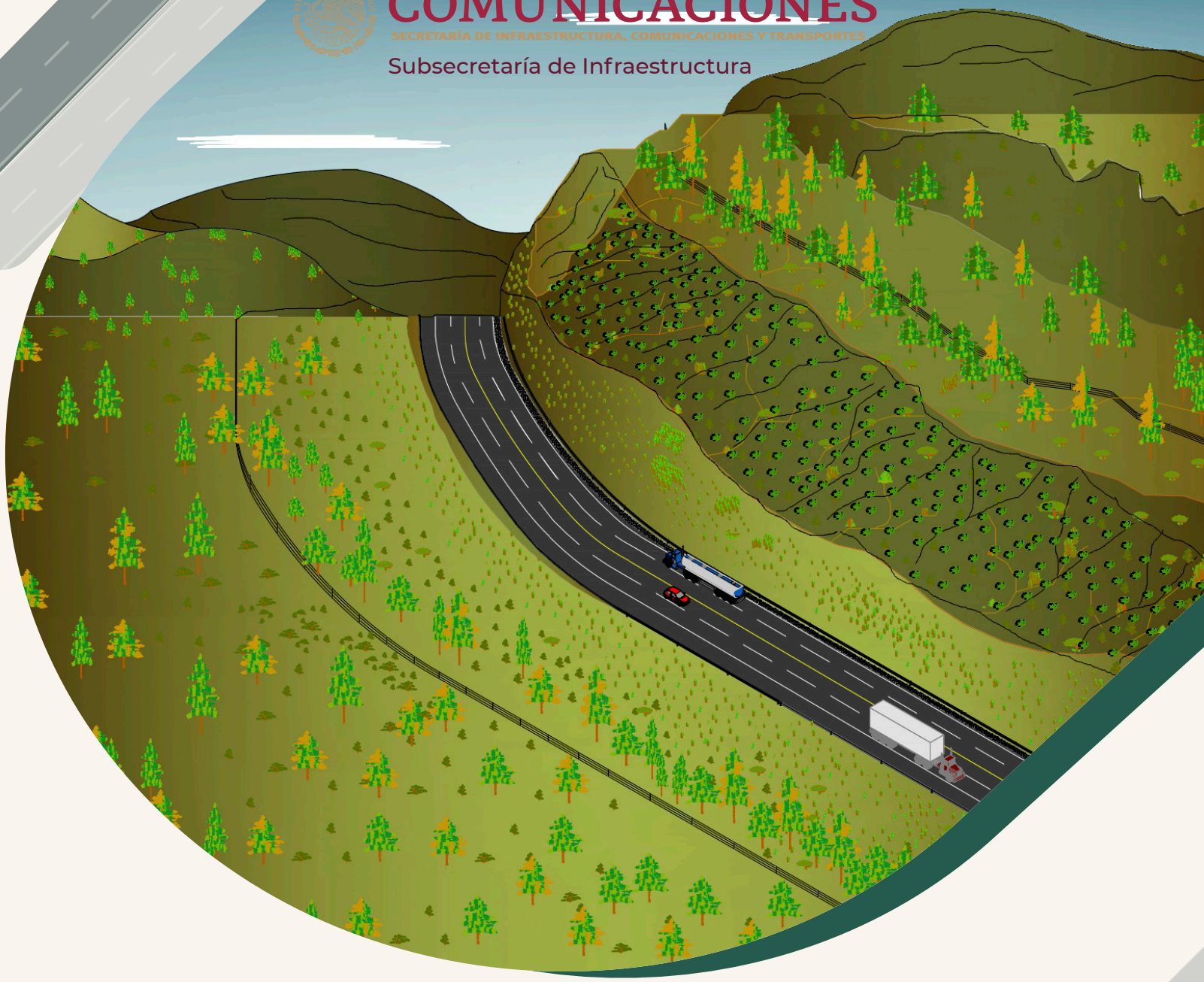
COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

Subsecretaría de Infraestructura



MANUAL DE REVEGETACIÓN Y REFORESTACIÓN EN LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA

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

MANUAL DE REVEGETACIÓN Y REFORESTACIÓN EN LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

MANUAL DE REVEGETACIÓN Y REFORESTACIÓN EN LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA

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

MANUAL DE REVEGETACIÓN Y REFORESTACIÓN EN LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA

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

Contenido

Prólogo 11

Antecedentes 13

Introducción 17

Objetivos del Manual 21

Objetivo general 21

Objetivos particulares 21

Alcances 23

Capítulo 1
Generalidades 25

1.1 Ruta de trabajo 26

Capítulo 2
Planeación de la revegetación en la infraestructura carretera 29

2.1 Identificación de los objetivos de la infraestructura carretera 30

2.2 Definición de los objetivos de la revegetación 30

2.3 Análisis de la línea de base de la vegetación 33

2.3.1 Consulta de información cartográfica de uso del suelo y vegetación 33

2.3.2 Estudios previos del sitio 33

2.3.3 Muestreos de sitios de referencia 34

2.3.3.1 Información por recopilar con los muestreos de los sitios de referencia 36

2.3.3.2 Metodología para los muestreos de los sitios de referencia 39

2.4 Elección de sitios para la revegetación 51

2.4.1 Derecho de vía 51

2.4.1.1 Zonificación dentro del derecho de vía 51

2.4.1.2 Áreas recomendadas para la revegetación 53

2.4.2 Sitios fuera del derecho de vía ocupados temporalmente por las obras de infraestructura carretera 55

2.4.2.1 Caminos de acceso temporales 55

2.4.2.2 Bancos de préstamo de materiales y plantas de trituración 56

2.4.2.3 Plantas de asfalto 57

2.4.2.4 Bancos de tiro 58

2.4.2.5 Campamentos y patios de maquinaria 59

2.4.3 Sitios propuestos para revegetar como medida de compensación ambiental 60

2.4.4 Sitios abandonados por rectificación de trazo 61

2.5 Caracterización de los sitios a revegetar 62

2.5.1 Análisis de la estructura de la vegetación 62

2.5.1.1 Estructura vertical de la vegetación 62

2.5.1.2 Estructura horizontal de la vegetación 63

2.5.2 Análisis del suelo 63

2.5.2.1 Propiedades físicas del suelo 64

2.5.2.2 Propiedades químicas del suelo 71

2.5.3 Análisis de la disponibilidad de nutrientes esenciales en el suelo 73

2.5.4 Análisis de la fragmentación del paisaje 78

2.5.5 Identificación de actividades antropogénicas que pueden afectar los sitios a revegetar 79

2.6 Identificación de unidades de revegetación y selección de la paleta vegetal 81

2.6.1 Definición de las unidades de revegetación 81

2.7 Gestión socioambiental de predios para revegetación 83

2.7.1 Compensación ambiental como medida de mitigación a las afectaciones de la infraestructura carretera 84

2.7.2 Restauración productiva: una alternativa de compensación socioambiental 85

2.7.3 Bondades de la compensación socioambiental mediante la restauración productiva 89

2.7.4 Identificación de actores involucrados 90

2.7.5 Desarrollo de un Plan de Compensación Ambiental 91

Capítulo 3
Ejecución de la revegetación en sitios afectados por la infraestructura carretera 93

3.1 Especificaciones técnicas de la revegetación para los diferentes sitios afectados por la infraestructura carretera 93

3.1.1 Derecho de vía 96

3.1.1.1 Áreas de cortes y terraplenes 96

3.1.1.2 Área libre de infraestructura permanente dentro del derecho de vía 102

3.1.1.3 Área de cauces fluviales 104

3.1.2 Sitios fuera del derecho de vía ocupados temporalmente por las obras de infraestructura carretera 105

3.1.2.1 Caminos de acceso temporales 105

3.1.2.2 Bancos de préstamo de materiales y plantas de trituración 107

3.1.2.3 Plantas de asfalto 108

3.1.2.4 Bancos de tiro 110

3.1.2.5 Campamentos y patios de maquinaria 111

3.1.3 Sitios propuestos para revegetar como medida de compensación ambiental 113

3.1.4 Sitios abandonados por rectificación de trazo 115

3.2 Aprovisionamiento de insumos para la revegetación 116

3.2.1 Rescate de plantas, semillas y esquejes de especies nativas 117

3.2.2 Compra de plantas 121

3.2.3 Propagación de especies nativas en vivero 122

3.2.3.1 Establecimiento de un vivero rústico 122

3.2.3.2 Propagación de plantas nativas por semilla 125

3.2.3.3 Propagación de plantas nativas por esqueje 132

3.2.3.4 Propagación de plantas nativas por acodo 138

3.2.3.5 Otras estructuras vegetales empleadas en la propagación 139

3.2.3.6 Prácticas recomendadas para el cuidado de plantas en vivero 140

3.3 Preparación y limpieza del terreno 159

3.3.1 Manejo del material vegetal extraído de las obras 160

3.3.2 Prácticas para la protección contra incendios (brechas cortafuego) 161

3.3.2.1 Apertura de brechas cortafuego 162

3.3.2.2 Líneas negras 162

3.3.2.3 Mensajes informativos 163

3.3.2.4 Brechas individuales contra incendios 164

3.3.3 Cercado de sitio para protección contra animales 165

3.3.3.1 Cerco de piedra 167

3.3.3.2 Cerco de alambre de púas 168

3.3.3.3 Cerco vivo 169

3.4 Siembra y plantación 170

3.4.1 Métodos de siembra 170

3.4.1.1 Tipos de siembra 174

3.4.2 Métodos de plantación 178

3.4.2.1 Diseño de plantación 178

3.4.2.2 Trazado y marqueo de la plantación 183
3.4.2.3 Mejoradores del suelo y/o fertilizantes 185
3.4.2.4 Apertura de cepas 186
3.4.2.5 Transporte de la planta a los sitios de revegetación 187
3.4.2.6 Establecimiento de la plantación 189
3.4.2.7 Construcción de cajetes y colocación de tutores 190

3.5 Marcación y georreferenciación de la revegetación 193

3.6 Riego de asentamiento 194

3.7 Bitácora de plantación 195

Capítulo 4
Conservación de sitios revegetados 197

4.1 Seguimiento de la plantación mediante bitácora de mantenimiento 198

4.2 Riego 198

4.3 Deshierbe 200

4.4 Podas y aclareos 200

4.5 Fertilización 201

4.6 Reconformación de cajetes 202

4.7 Corrección de tutores 203

4.8 Conservación de cercado 203

4.9 Manejo de plagas y enfermedades 204

4.9.1 Medidas preventivas 205
4.9.2 Medidas de control 205
4.9.3 Identificación de plagas 206

4.10 Reposición de plantas muertas 214

Capítulo 5
Monitoreo de áreas revegetadas 215

5.1 Plan de monitoreo 215

5.2 Muestreo del suelo en sitios revegetados 216

5.2.1 Indicadores del suelo 217

5.3 Indicadores de éxito de la revegetación 223

5.3.1 Germinación de las semillas 224
5.3.2 Estimación de la supervivencia 224
5.3.3 Estimación del estado sanitario 225
5.3.3.1 Abundancia del follaje 225
5.3.3.2 Color de las hojas 226
5.3.3.3 Color del tallo 227
5.3.3.4 Presencia de plagas o enfermedades 228
5.3.3.5 Vigor de la plantación 229
5.3.4 Crecimiento 231
5.3.5 Presencia de especies exóticas/invasivas 232

5.4 Reporte del monitoreo y medidas correctivas 232

Capítulo 6
Desarrollo de un proyecto ejecutivo de revegetación 237

6.1 Diagrama de decisión para un proyecto de revegetación 241

Referencias bibliográficas 243

Glosario 253

Índice de figuras 263

Índice de tablas 267

Prólogo

La variedad en recursos forestales coloca a México entre los diez primeros países del mundo por su diversidad biológica, la cual cuenta con más especies de pinos, magueyes, cactus y encinos que ningún otro país, y cuya riqueza tiene su origen en la gran diversidad de climas y en el relieve montañoso de gran parte de su territorio.

Desde hace tiempo, nuestro país enfrenta procesos crecientes de deforestación, pérdida y degradación de los ecosistemas, generalmente relacionados con los avances de las fronteras agrícolas y pecuarias. A través de los años, la demanda de terrenos para usos como son los desarrollos urbanos, los centros turísticos y la infraestructura carretera, entre otros, ha degradado o destruido totalmente grandes superficies de vegetación.

Como consecuencia de estos procesos de degradación existen grandes áreas en las que los disturbios han sido tan intensos y recurrentes que se ha eliminado de manera total cualquier posibilidad de que la vegetación recupere su estado original por medios naturales. Por ello, es necesario intervenir para facilitar la estabilización de las condiciones actuales del ambiente y promover su mejoramiento a través de diversas prácticas y actividades entre las que sobresalen la revegetación, la reforestación y las prácticas de conservación de suelos.

En este sentido, la riqueza y variabilidad en factores tan diversos como el clima, la topografía, la geología, los usos tradicionales del suelo, la biodiversidad de flora y fauna, el sistema paisajístico, las áreas naturales protegidas y el patrimonio social y cultural de México, requieren de la aplicación cotidiana de instrumentos y criterios ambientales que adquieren un significado y magnitud especial para preservar la riqueza de nuestro país.

El *Manual de Revegetación y Reforestación en la Infraestructura Carretera* se alinea con el objetivo 15 de la *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*, que busca proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de la biodiversidad. Este documento tiene como propósito coadyuvar con el Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), que busca generar un modelo de desarrollo orientado a cuidar el medio ambiente.

Asimismo, las acciones aquí propuestas en pos de recuperar la cubierta vegetal que se pierde directa o indirectamente por la construcción de infraestructura carretera forman parte del compromiso que México ha adquirido al adherirse al Acuerdo de París adoptado en 2015 durante la COP21, cuya meta es limitar el aumento de la temperatura mundial mediante diversos mecanismos, entre ellos, alentar a los países a conservar y mejorar los sumideros y depósitos de GEI (artículo 5 del Acuerdo).

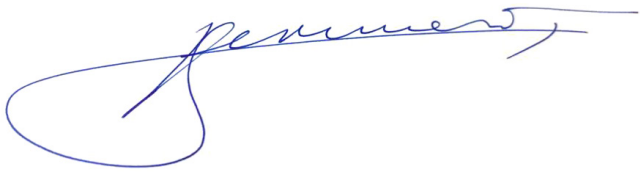
En este sentido, este Manual proporciona herramientas útiles y diversas técnicas para el restablecimiento de la vegetación en las áreas afectadas por la infraestructura carretera, y además, pretende lograr que los proyectos de revegetación y reforestación

cumplan con los requerimientos de los permisos ambientales impuestos por las autoridades en esta materia, y que en éstos se logren resultados positivos y de contribución significativa y permanente sobre la biodiversidad del país, en alineación con los tratados y acuerdos en materia ambiental a los que México se ha suscrito.

Si bien las innovaciones en la tecnología e infraestructura son importantes, éstas son limitadas en tanto no existan cambios de actitud que se apoyen en la mejora de los hábitos de vida y de trabajo, lo que significa que el componente personal y de sensibilización es clave para la implantación de buenas prácticas ambientales. Una buena gestión ambiental en la ejecución de las actividades de todos los sectores de la economía es el resultado de la adecuada cualificación profesional, formación y sensibilización de sus colaboradores. Es así como la implementación de mejores prácticas ambientales debe acompañar a la inversión y al desarrollo que van en aumento en los últimos años, especialmente en lo que corresponde a la infraestructura carretera, la cual fomenta el desarrollo económico y bienestar social.

Es fundamental que el progreso económico y social en México se realice en un marco donde la Sociedad y el Estado estén alertas de que el desarrollo de estos aspectos debe estar alineado con la política ambiental que caracteriza al país.

Finalmente, este Manual realizado por la Dirección General de Servicios Técnicos pretende servir como instrumento rector para los proyectistas y constructores de infraestructura carretera nueva, así como para la modernización y conservación de la existente, en un contexto de sustentabilidad y de fomento a la preservación de la biodiversidad.



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

Antecedentes

México, al igual que muchos países del mundo, enfrenta el reto de atender numerosos problemas relacionados con el ambiente, que en el futuro inmediato podrían constituir un serio obstáculo para continuar con su desarrollo y alcanzar la sustentabilidad. Reducir la pérdida y la degradación de sus ecosistemas terrestres y acuáticos, conservar su biodiversidad, asegurar la disponibilidad y la calidad del recurso hídrico, reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), avanzar en la adaptación a los efectos del cambio climático y mejorar la calidad de aire en muchas zonas urbanas del país, son algunos de los asuntos más importantes que es necesario atender en términos ambientales.

Es bien sabido que el deterioro del ambiente se ha ocasionado derivado del desarrollo industrial y urbano observado desde el siglo XVIII, el cual ha traído la mayor transformación de los ecosistemas terrestres por causas antrópicas. De acuerdo con la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (Millenium Ecosystem Assessment, 2005), para el año 2000, 42% de los bosques, 18% de las zonas áridas y 17% de los ecosistemas insulares habían sido transformados a nivel mundial, principalmente para destinar la superficie a actividades agropecuarias, asentamientos humanos, infraestructura carretera e instalaciones industriales. México no ha sido ajeno a este proceso y también ha sufrido una fuerte degradación y pérdida de sus ecosistemas terrestres. Una porción muy importante del territorio se ha transformado en campos agrícolas, pastizales inducidos y zonas urbanas, y los ecosistemas naturales que aún persisten muestran, en mayor o menor medida, signos de perturbación.

En este sentido, para contrarrestar las afectaciones por el cambio de uso de suelo derivado del desarrollo de infraestructura carretera, el diseño y la construcción de ésta debe alinearse a las estrategias y procedimientos que los instrumentos de política ambiental en México dictan para la protección de los ecosistemas terrestres. La legislación ambiental en México ha implementado diferentes instrumentos, uno de ellos es la gestión del trámite de autorización para el cambio de uso de suelo en terrenos forestales (CUSTF), el cual debe realizarse por medio de la presentación de un Estudio Técnico Justificativo (ETJ), documento que la promovente del proyecto que pretende cambiar la vocación de un determinado terreno forestal debe presentar junto con la solicitud de autorización de cambio de uso de suelo ante la autoridad competente de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Dicho estudio se ciñe a la presentación de información técnica de campo, así como de gabinete, obtenida a través de consultas en fuentes académicas y de investigación debidamente reconocidas, con la finalidad de obtener la evidencia suficiente para demostrar la viabilidad de llevar a cabo la remoción de la vegetación en terrenos forestales y, por ende, demostrar la excepción de la autorización, en los términos que establece el artículo 93 de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.

Existe otro instrumento de la legislación nacional en la materia y es el Ordenamiento Ecológico del Territorio, cuyo objetivo es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del ambiente y la preservación y

el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de éstos (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente, 2015).

El procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental es otro instrumento de política ambiental, y tuvo inicio en México en 1988 con la publicación en el *Diario Oficial de la Federación* de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA). Su propósito es identificar, cuantificar y evaluar los impactos que la ejecución de un proyecto determinado puede ocasionar al ambiente a través de un documento denominado Manifestación de Impacto Ambiental (MIA), el cual elabora la promovente de las obras y somete a la evaluación de autoridades ambientales como la SEMARNAT. Los resultados de la evaluación determinan la factibilidad ambiental del proyecto (mediante el análisis costo-beneficio ambiental) y establecen las condiciones obligatorias para su ejecución, así como las medidas de prevención, mitigación y compensación de los posibles impactos ambientales, todo ello a fin de evitar o reducir al mínimo los efectos negativos sobre el ambiente y la salud humana.

Con base en información publicada por la SEMARNAT, en el periodo 2005-2017 recibió 8,206 proyectos (631 en promedio por año) y atendió 8,018 evaluaciones. La mayoría de los proyectos ingresados correspondieron a obras y actividades de servicios de los sectores: vías generales de comunicación (2,964 proyectos), recursos hidráulicos (1,305), turismo (838), industria (657), energético (624) y gasero (591).

En este sentido, para lograr los objetivos planteados en las condicionantes requeridas a los ejecutores de proyectos de infraestructura carretera a través de los oficios resolutivos emitidos por las autoridades en materia ambiental, tanto en materia de impacto ambiental como en materia de cambio de uso de suelo, surge la necesidad de elaborar un documento de consulta en el cual se expongan lineamientos y recomendaciones para realizar con éxito las actividades de revegetación, incluyendo criterios para la elección de sitios a intervenir, las actividades que deben realizarse en la referida revegetación, así como los periodos necesarios para su conservación.

Expuesto lo anterior, la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) a través de la Dirección General de Servicios Técnicos pretende contribuir con el desarrollo sostenible en nuestro país a través de un documento que guíe a los profesionales responsables del diseño y construcción de la infraestructura carretera a implementar acciones para el cuidado del ambiente. Y es en este documento donde se proporcionan los criterios y recomendaciones para la planeación, ejecución, conservación y monitoreo de las actividades necesarias para la reposición de la cobertura vegetal de áreas afectadas por la infraestructura carretera.

Es de vital importancia que las actividades de revegetación en la infraestructura carretera sean continuas, es decir, sin interrupciones o detenciones totales para que la reposición de la cubierta vegetal se concluya con éxito. En este sentido, teniendo claros los alcances y objetivos de la revegetación que se pretende realizar, es posible tener una estimación económica para la asignación de presupuesto y, de esta manera, cumplir con los periodos adecuados para lograr resultados positivos y significativos sobre los ecosistemas.

Cabe destacar que, aunque desde hace ya algunas décadas que se realizan actividades de revegetación del derecho de vía en nuestro país, muchas veces éstas se realizan con plantas exóticas, ya que éstas son percibidas como económicas, de alta disponibilidad, y de fácil establecimiento en sitios perturbados. Sin embargo, son muchos

los casos en los que esta práctica ha demostrado no ser sostenible ni adecuada, ya que las plantas exóticas pueden dispersarse y proliferar hasta volverse problemáticas, o, por el contrario, fracasan en su persistencia porque no están adaptadas al clima local. Además, cuando las especies exóticas se establecen impiden la reintroducción de las plantas nativas deseadas para el restablecimiento de la cubierta vegetal que se encontraba previo a la intervención de la infraestructura carretera. Asimismo, un problema que se observa frecuentemente en los proyectos de reposición de la vegetación en el derecho de vía es que ésta se establece sin ninguna planeación ni seguimiento. Incluso en los casos en que se han utilizado especies nativas, fácilmente adaptables, la falta de seguimiento significó muchas veces un fracaso. Son muchos los esfuerzos realizados en el pasado para revegetar zonas perturbadas del derecho de vía, los cuales han mostrado que la falta de información, organización y visión a largo plazo, así como la falta de estándares y lineamientos para llevar a cabo la revegetación, impide que se tengan buenos resultados. La ineficiencia en los esfuerzos de revegetación también ha ocasionado problemas en el control de la erosión de los suelos, particularmente en los cortes de lomeríos, y económicamente se ha observado que esto eleva los costos que están asociados con la conservación de esos sitios.

Afortunadamente, de forma paulatina estos problemas se han hecho evidentes y actualmente se buscan soluciones, tal es el caso de la elaboración de este Manual, que tiene como uno de sus pilares la recomendación del uso de especies nativas elegidas específicamente para el clima de la región y de acuerdo con el inventario de especies locales elaborado para cada caso. Además, se recomienda que cualquier actividad de revegetación sea planeada e implementada por profesionales especialistas de múltiples disciplinas tales como vías terrestres, arquitectura del paisaje, edafología, ecología, botánica, genética y conservación de la vida silvestre, entre otras.

COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

Introducción

Uno de los grandes desafíos para México es conservar la extensión de sus bosques, selvas, humedales, zonas áridas y semiáridas y, más aún, tratar de recuperar las superficies que se han perdido o degradado a causa de factores como el cambio de uso del suelo a favor de actividades de diversa índole, como es la agricultura, la ganadería, la construcción de infraestructura carretera y la expansión de las áreas urbanas, entre otras. Lo anterior, con la finalidad de mantener la conectividad ecológica entre estas extensiones para favorecer el flujo genético entre las especies.

México es uno de los países con mayor diversidad biológica del mundo, no sólo por poseer una importante cantidad de especies sino también por su variabilidad biológica a nivel genético y de ecosistemas; se estima que en el país existe entre un 10 y 12% de las especies del planeta. La extraordinaria biodiversidad del país se explica principalmente por la complejidad de su topografía, la variedad de climas y la convergencia de dos zonas biogeográficas: la Neártica y la Neotropical.

La flora mexicana consta aproximadamente de 30,000 especies, con un endemismo superior al 40%. Destaca la variedad en familias como las cactáceas, con 850 especies (84% endémicas) y las orquídeas, con 920 especies (48% endémicas), así como en el género *Pinus* que presenta 48 especies (43% endémicas) en nuestro país.

Los principales tipos de vegetación de México y la superficie potencial en la que se distribuyen (en porcentaje) se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 1

Tipos de vegetación de México y la superficie potencial en la que se distribuyen.

Ecosistema	Tipos de vegetación	Superficie (%)
Bosques	Coníferas	5.9
	Coníferas y latifoliadas	9.4
	Latifoliadas	8.2
	Bosque mesófilo	1.3
Selvas	Selvas altas y medianas	9.8
	Selvas bajas	11.9
Otras asociaciones		0.4
Manglar		0.7
Matorral xerófilo	Zonas semiáridas	14.7
	Zonas áridas	26.1
Otras áreas forestales		11.6
Total		**100**

Fuente: Modificado de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2014.

Es necesario aclarar que a lo largo del presente Manual se debe entender a la revegetación como la acción de cubrir con vegetación los espacios que fueron perturbados, y que hay diferentes tipos de actividades de revegetación como son la reforestación, la restauración, la recuperación y la rehabilitación vegetal. En la Tabla 2 se muestran las definiciones de cada una de estas actividades, de acuerdo con los objetivos que persigue cada una, y es importante recalcar que en este documento se utilizará el concepto de revegetación de forma general, sin embargo, para cada infraestructura carretera en análisis se elegirán las actividades de revegetación específicas para las necesidades y condiciones de los sitios que se pretende intervenir.

Tabla 2
Términos utilizados para definir los objetivos específicos de la revegetación.

Acción	Descripción
Revegetación	Consiste en cubrir con plantas (preferentemente nativas) los espacios que fueron perturbados. Es un término general que puede referirse a la reforestación, a la restauración, recuperación o rehabilitación vegetal, realizadas para reestablecer la vegetación en un sitio.
Reforestación	Actividades de plantación o siembra de árboles en terrenos forestales (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2010). Establecimiento de especies forestales en terrenos forestales (Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, 2018). Es la acción de poblar o repoblar con especies arbóreas o arbustivas, mediante plantación, regeneración manejada o siembra, cualquier tipo de terreno (Autoridad del Canal de Panamá [ACP], 2006).
Restauración vegetal	Es la recreación de la estructura y la función de la comunidad de plantas, idéntica a la que existía antes de la perturbación. El objetivo de la restauración es la conservación, con la intención de maximizar la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas (Jordan III *et al.,* 1987). Conjunto de actividades tendientes a la rehabilitación de un ecosistema forestal para recuperar parcial o totalmente sus funciones originales (Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, 2018). Conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales (Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, 2015).
Recuperación vegetal	Es la recreación de un sitio que ha sido diseñado para ser habitado por las mismas especies o similares a las que existían antes de la perturbación. Difiere de la restauración en que la diversidad de especies es menor y los proyectos no recrean idénticamente la estructura, ni el funcionamiento que había antes de la perturbación. Sin embargo, el objetivo a largo plazo es la estabilización con un aporte mínimo (Jordan III *et al.,* 1987).
Rehabilitación vegetal	Este proceso crea un ecosistema alternativo que tiene una estructura y función diferente a la comunidad que había antes de la perturbación; puede ser un parque, un pastizal, o una plantación silvícola (Jordan III *et al.,* 1987).

Las comunidades vegetales son dinámicas y frecuentemente son perturbadas por diferentes factores naturales y antrópicos (incendios, tala, agricultura, entre otros). Cuando el factor que las perturba se detiene, comienza a desarrollarse vegetación secundaria (en un proceso de sucesión ecológica secundaria), y son las especies de estas comunidades las que cobran mayor relevancia en la revegetación, ya que las condiciones ambientales en las que se desarrollan estas especies secundarias muchas veces son similares a las que prevalecen en las superficies que se quiere revegetar en la infraestructura carretera (esto es porque la infraestructura carretera también es un factor perturbador, por lo tanto, en su periferia tiende a desarrollarse vegetación secundaria).

Uno de los principales impactos que ocasiona la infraestructura carretera es la fragmentación de los ecosistemas, proceso por el cual el ecosistema se subdivide en porciones más pequeñas y con formas más complejas, y que conlleva cambios en su composición, funcionamiento y estructura, provocando el aislamiento de los organismos y la pérdida de biodiversidad (puede llegar a reducirla de un 13% hasta 75%). Además, la fragmentación disminuye la retención de nutrientes y altera la dinámica trófica (Fischer y Lindenmayer, 2007; Haddad *et al.*, 2015).

Considerando que a través de la revegetación se busca revertir las afectaciones que la infraestructura carretera genera al paisaje por la fragmentación de ecosistemas, el diseño de proyectos para recuperar la cobertura vegetal deberá realizarse con especial atención a las características de cada zona a intervenir, es decir, se recomienda que, además de considerar la región en la cual se implementan las acciones de revegetación, se tomen en cuenta las características y necesidades de los sitios específicos a revegetar, por ejemplo, si se trata del derecho de vía, el Sistema Ambiental (SA), el Sistema Ambiental Regional (SAR) o la Cuenca Hidrológica Forestal (CHF). Asimismo, las propuestas de revegetación deberán de incluir acciones para dar continuidad a los parches de vegetación que se generarán por la construcción de la infraestructura carretera.

Debe tenerse en cuenta, además, que la revegetación es una estrategia que puede lograrse únicamente fortaleciendo simultáneamente procesos como la sucesión vegetal, la productividad, la ecología del suelo, y la incorporación de nutrientes, entre otros. De esa forma, se busca permitir que el sistema regrese, con un poco de ayuda, a condiciones similares a las originales utilizando especies nativas (Martínez, 1996).

En este sentido, para favorecer la reposición de la cobertura vegetal y el funcionamiento de los sistemas naturales afectados por la construcción de la infraestructura carretera, este Manual pretende servir como guía metodológica para llevar a cabo las mejores prácticas de revegetación, con base en información y manuales técnicos de instituciones como la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), la SEMARNAT, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), entre otras, y la experiencia acumulada en el desarrollo de proyectos de reposición de vegetación en el contexto de infraestructura carretera.

Lo anterior para que la implementación de la revegetación y sus diferentes actividades en la infraestructura carretera se lleve a cabo de forma ordenada, bajo una correcta planeación, ejecución, conservación y monitoreo de los sitios, áreas o regiones tratadas, incorporando como criterio relevante, la focalización de acciones en zonas

críticas. Además, este documento busca servir como directriz para unificar las propuestas de revegetación que presente la SICT a la SEMARNAT en el cumplimiento de las condicionantes que solicitan las autoridades ambientales del país, y en apego a la legislación vigente.

Es importante mencionar que en este documento se hará referencia a la infraestructura carretera, sin embargo, los criterios y recomendaciones contenidos en el Manual son aplicables tanto a carreteras como a vías férreas, ya que ambas traen consigo el cambio de uso de suelo (definido como la remoción total o parcial de la vegetación forestal de los terrenos para destinarlos o incluirlos a actividades no forestales) e implican procesos de deforestación, alteración y fragmentación de los ecosistemas.

Objetivos del Manual

Objetivo general

Presentar criterios y recomendaciones para realizar la planeación, la ejecución, la conservación y el monitoreo de diversas actividades que pueden realizarse para lograr la reposición de la cobertura vegetal de los espacios perturbados por la infraestructura carretera, utilizando las especies nativas de los ecosistemas afectados.

Objetivos particulares

1) Proporcionar las alternativas de acciones de revegetación para la reposición de la cubierta vegetal de los sitios perturbados.
2) Guiar la planeación, la ejecución y la conservación de la revegetación de los sitios perturbados por la infraestructura carretera.
3) Brindar recomendaciones para el monitoreo y la evaluación de los sitios revegetados.
4) Establecer las bases para la elaboración de proyectos ejecutivos de revegetación que se presenten ante las autoridades ambientales para la autorización de proyectos de infraestructura carretera.
5) Presentar medidas correctivas para lograr los objetivos de la revegetación.
6) Proponer acciones de revegetación enfocadas en la estabilización de cortes y terraplenes.
7) Minimizar los pasivos ambientales que dejan las modificaciones o rectificaciones de trazo y, en general, los proyectos de infraestructura carretera.

COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

Alcances

Este Manual proporciona criterios y recomendaciones para realizar las mejores prácticas de revegetación y las posibles actividades que derivan de ésta, tales como la reforestación, la restauración, la recuperación y la rehabilitación vegetal, las cuales persiguen, con diferente alcance, recuperar los espacios que fueron perturbados por la construcción de carreteras y vías férreas, tomando en cuenta las siguientes fases:

- Planeación de la revegetación en la infraestructura carretera. Implica la identificación de las áreas susceptibles para la reposición de cubierta vegetal, además de la descripción de las acciones más viables en función del tipo de infraestructura carretera que se haya desarrollado en ellas. Considera la caracterización de los sitios identificados para la revegetación, la gestión con los propietarios o poseedores de los predios, la definición de las especies vegetales que se establecerán, el esquema de provisión de plantas, la definición del diseño de plantación y los tipos de siembra a efectuarse. Además, incluye información sobre el programa de trabajo para el desarrollo de las actividades de revegetación.
- Ejecución de la revegetación. Se describen las actividades que se desarrollarán durante la implementación de la revegetación o de sus diferentes actividades, tales como preparación del sitio, limpieza, manejo de material vegetal, transporte de plantas a los sitios de revegetación, trazo y marqueo de la siembra o plantación, apertura de cepas, uso de mejoradores de suelo o fertilización, siembra, plantación, construcción de cajetes, colocación de tutores, riego de asentamiento, manejo de plagas y enfermedades, prácticas para la protección contra incendios y cercado de sitios para protección contra animales y otros factores de disturbio.
- Conservación de sitios revegetados. Se indican las acciones recomendadas para la etapa de conservación de la cobertura vegetal, considerada como fase crítica para lograr los objetivos de la revegetación. Dentro de esta etapa se contempla la reposición de plantas muertas, el mejoramiento del suelo, el riego, las podas y deshierbes, los aclareos, la fertilización, la reconformación de cajetes, la corrección de guías o tutores[1] de las plantas y el mantenimiento de cercado y de brechas corta fuego.
- Monitoreo de áreas revegetadas. Se describen las tareas de monitoreo recomendadas para dar seguimiento a la revegetación, así como los indicadores de evaluación de los resultados obtenidos y, de ser el caso, proponer las medidas correctivas que han de implementarse para lograr los objetivos planteados.

[1] Palo u otro objeto que se utiliza para formar la estructura de una planta.

COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

Capítulo 1
Generalidades

A través de los criterios y recomendaciones presentados en este Manual se ofrece una guía metodológica para llevar a cabo la reposición de la cubierta vegetal de los sitios afectados por las carreteras y vías férreas, con especial énfasis en la utilización de especies nativas de cada ecosistema intervenido. La revegetación y las diferentes actividades que esta acción representa traen consigo numerosos y diversos beneficios, algunos de ellos descritos en la siguiente Tabla.

Tabla 3
Beneficios de la revegetación con especies nativas.

Beneficio de la revegetación	Funciones de las plantas nativas
Mejoramiento del hábitat de polinizadores	Un beneficio importante derivado de la revegetación es mejorar el hábitat, a través de la selección adecuada de especies de plantas y de técnicas de mejoramiento de los sitios. Estas acciones favorecen el pecoreo, la reproducción, y el anidamiento de una gran variedad de polinizadores.
Estabilización de cortes y control de la erosión	Al controlar la erosión superficial mediante acciones de revegetación se protege la calidad del suelo y del agua, lo que es una prioridad en los proyectos de mitigación de impactos derivados de la construcción de la infraestructura carretera. Pastos nativos, malezas y otras plantas herbáceas pueden ayudar a resolver este reto, particularmente cuando se realizan al mismo tiempo tratamientos con acolchados apropiados. Los árboles y arbustos con raíces profundas pueden también mejorar la estabilidad de los cortes que se hacen para la infraestructura carretera.
Secuestro de carbono	La revegetación del derecho de vía con plantas nativas puede ayudar a mejorar la calidad del aire y del ambiente, ya que las plantas toman y reducen la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, lo almacenan en el suelo a largo plazo y liberan oxígeno. Además, la vegetación nativa requiere de menos labores de poda y menor uso de herbicidas y pesticidas, lo que implica una reducción de los costos de mantenimiento y de las emisiones de carbono a la atmósfera asociadas a esta actividad. En general, los proyectos de revegetación son una herramienta fundamental para contribuir a la reducción del cambio climático.
Enriquecimiento visual	La vegetación es utilizada para mejorar la experiencia estética del viajero y para reducir el impacto en calidad paisajística derivado de la infraestructura carretera. Las plantas silvestres con flores adhieren color y belleza en las diferentes épocas del año, los árboles deciduos proporcionan sombra, estructura vertical y cambio de color cuando llega la temporada de lluvia o se hace presente la temporada de secas. Las especies perennes permanecen verdes todo el año, añadiendo interés visual, estructura y verdor durante todas las estaciones del año. La vegetación puede mitigar los impactos visuales de la infraestructura carretera al mejorar el paisaje, amortiguar o esconder estructuras tales como gaviones o al cubrir laderas y cortes.

Beneficio de la revegetación	Funciones de las plantas nativas
Mejoramiento de la vida silvestre	Muchos caminos interceptan los corredores naturales de la fauna. La implementación de plantas nativas en los pasos para fauna silvestre contribuye sustancialmente a que la infraestructura carretera recupere la conectividad ecológica al permitir el flujo de ésta. Además, la presencia de aves y pequeños mamíferos puede favorecerse cuando se reestablecen las especies de plantas apropiadas a cada ecosistema.
Reducción en costos de manejo	Contar con una propuesta de revegetación alineada a las necesidades de cada infraestructura carretera ayudará a optimizar los recursos económicos disponibles y garantizar su correcta implementación. A través de la adecuada planeación se pueden reducir los elevados costos de implementación de acciones no previstas, tales como la reposición de ejemplares muertos o el mantenimiento costoso derivado de una paleta vegetal mal seleccionada.

1.1. Ruta de trabajo

Para que una propuesta de revegetación sea adecuada y permita conseguir resultados exitosos, ésta debe organizarse mediante una ruta de trabajo. La ruta de trabajo que se elabore tendrá que considerar todas y cada una de las etapas que contempla el proyecto de establecimiento de la revegetación, además, tendrá que contemplar como punto de partida el o los objetivos de la infraestructura carretera, es decir, empezar por considerar si se trata de una carretera o vía férrea nueva, de una modernización, o de una conservación.

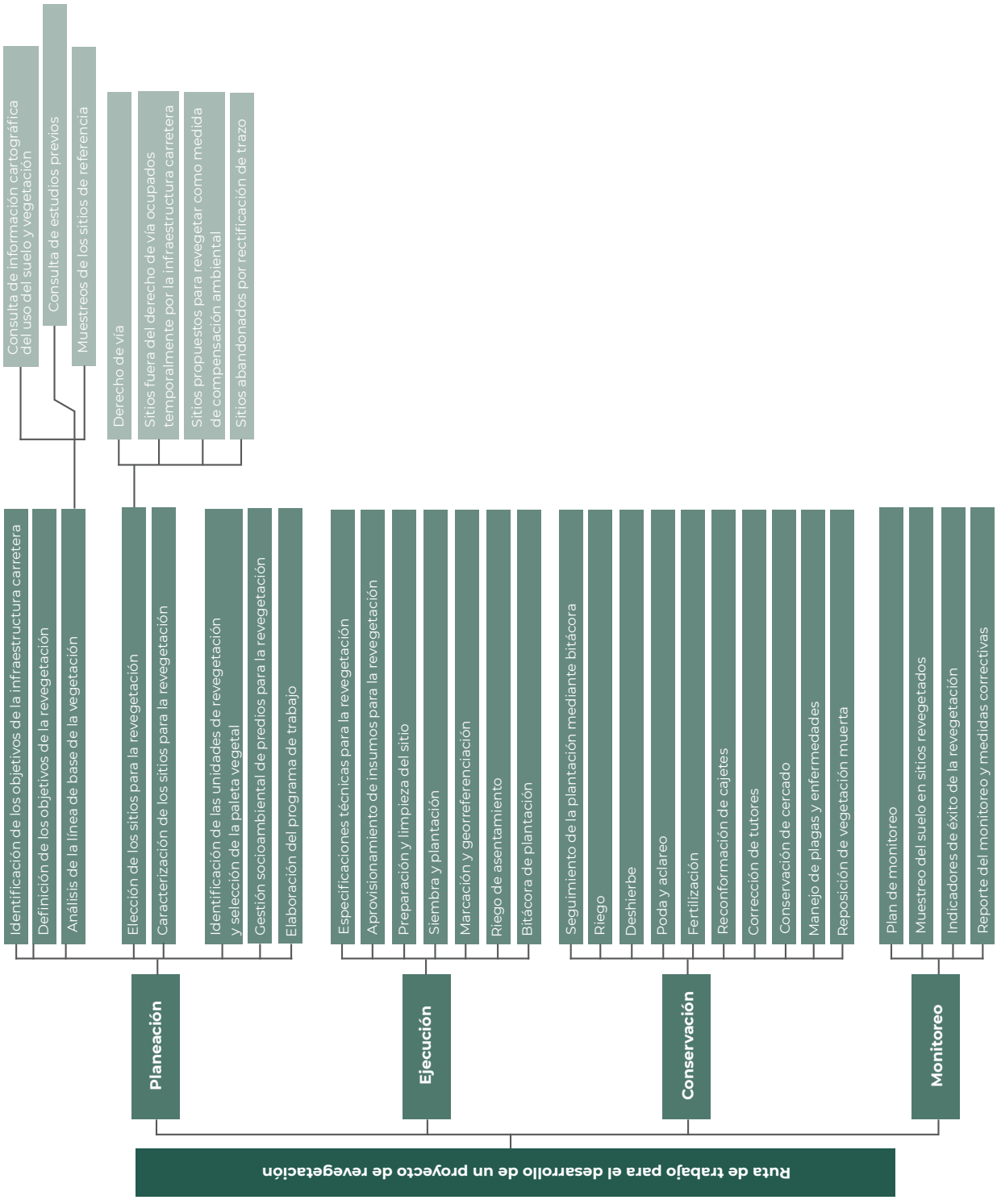
A continuación se presenta la estructura de la ruta de trabajo donde, a través de cuatro fases, se identifican las actividades específicas a realizarse para la adecuada implementación de la revegetación en la infraestructura carretera.

La Ruta de Trabajo expuesta está encaminada a lograr los objetivos de los proyectos de revegetación que se pretenda llevar a cabo en los sitios afectados por la infraestructura carretera, tomando en cuenta las características y necesidades de cada área a intervenir, así como el manejo integral de la biodiversidad y las funciones ecológicas iniciales del sitio en análisis.

Se recomienda seguir el ciclo completo de esta ruta de trabajo para la implementación de la revegetación a diferentes escalas, considerando los aspectos ecológicos, económicos y sociales del entorno de cada infraestructura carretera.

Figura 1

Ruta de trabajo para el desarrollo del ciclo completo de la implementación de revegetación en la infraestructura carretera.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

Capítulo 2
Planeación de la revegetación en la infraestructura carretera

La planeación debe realizarse siguiendo los criterios que a continuación se describen, incluyendo la elaboración del programa de trabajo del cual dependerá el cumplimiento de los objetivos de la revegetación.

En la fase de planeación se definen los objetivos de la infraestructura carretera y de la revegetación que se pretende implementar en ella. A través de éstos es posible asegurar en gran medida que las acciones a implementar para la preservación de los ecosistemas intervenidos por la infraestructura carretera funcionen adecuadamente. Cuando los objetivos se entienden y las expectativas son claras, las fases de ejecución, conservación y monitorización son fáciles de desarrollar y se obtienen buenos resultados.

En esta fase, los objetivos de la revegetación son usados como base para determinar las actividades específicas a desarrollar. Por ejemplo, son distintos los objetivos, las actividades y la magnitud de la propuesta de revegetación asociada a la modernización de una carretera a lo que implica la apertura total de infraestructura carretera nueva.

El programa de trabajo de la revegetación dependerá de los objetivos y las actividades identificadas en función del tipo de infraestructura carretera y, a partir de ahí, de las áreas cuya cubierta vegetal se pretende recuperar, por ejemplo, hay actividades que se pueden implementar dentro del derecho de vía, otras se realizarán en áreas de infraestructura permanente o temporal o áreas con servicios de apoyo, y otras aplican para las áreas que se proponen en compensación derivado de las autorizaciones ambientales a los que se sujeten los proyectos de carreteras y vías férreas.

En este sentido, se recomienda que al desarrollar un proyecto ejecutivo de revegetación se ingrese de manera simultánea junto con los estudios ambientales que se presenten ante las autoridades ambientales para su evaluación. Esto permite garantizar la planeación de estas actividades desde la etapa inicial del proyecto, lo que representa una importante optimización de costos. Es muy frecuente observar en proyectos de infraestructura carretera que la ejecución de acciones no planificadas suele acompañarse de costos adicionales no previstos.

2.1 Identificación de los objetivos de la infraestructura carretera

La propuesta de revegetación dependerá del objetivo y del alcance de la infraestructura carretera al que se asocie, el cual puede ser:

- Apertura total de infraestructura carretera nueva.

La propuesta de revegetación tiene que elaborarse con el objetivo de restablecer la funcionalidad de los ecosistemas afectados, además de considerar con anticipación las técnicas de revegetación que puedan aplicar a cada sitio, mejorando la conectividad de los parches de vegetación que se puedan generar y favoreciendo la recuperación del paisaje.

- Modernización de infraestructura carretera.

En este caso la propuesta de revegetación tiene que elaborarse con el objetivo de revertir las afectaciones por la modernización de la infraestructura carretera, por lo que considera la identificación de las áreas que son susceptibles a revegetar, por ejemplo, cortes y terraplenes, entre otras, para que de esta manera las propuestas sean acordes a cada sitio.

- Conservación de la infraestructura carretera existente.

Para este caso aplican diversas opciones de revegetación según sea el estado de la vegetación en la infraestructura carretera. En infraestructura carretera donde fueron implementadas acciones de revegetación sin obtener resultados exitosos (ya sea por acciones que no fueron correctamente ejecutadas o por falta de seguimiento), se elaborará una nueva propuesta o se propondrán medidas de compensación (a realizarse en los sitios revegetados o en terrenos adicionales) para las afectaciones que haya causado la infraestructura en la vegetación de los sitios intervenidos.

2.2 Definición de los objetivos de la revegetación

Los objetivos de la infraestructura carretera se relacionan con la provisión de servicios de transporte y comunicación, y actualmente también consideran la preservación de los ecosistemas en los que se desarrollan.

En este sentido, muchos proyectos de revegetación 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). En este alcance, se incrementará el hábitat de polinizadores, se protegerán los recursos suelo y agua, se favorecerá el secuestro de carbono, se mejorará la estética del derecho de vía, se limitará o controlará a las plantas invasivas y se mejorará la seguridad y el funcionamiento del camino, mientras se protege al ambiente.

Tal como se presentó en la Tabla 2 de la introducción de este documento, algunos términos comúnmente utilizados para hablar de acciones de revegetación son reforestación, recuperación, rehabilitación y restauración vegetal, y aunque sus objetivos y alcance son distintos, comparten como base la mejora de un sitio mediante la recupe-

ración de la cubierta vegetal. Estos objetivos se utilizarán para evaluar posteriormente los resultados de las acciones implementadas.

La ubicación y uso del suelo en el sitio donde se pretende restablecer la vegetación permite identificar si se localiza dentro de alguna reserva natural, área natural protegida, o zona prioritaria para la conservación ecológica a nivel federal, municipal o estatal, o si en él habita alguna especie que esté protegida por la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010.

Si los sitios a revegetar cumplen con alguno de los puntos anteriores, entonces el objetivo principal de la revegetación podría ser la restauración o la recuperación vegetal. En tal caso sería necesario tomar en cuenta que la restauración vegetal no sólo implica recuperar la cubierta vegetal, sino recuperar integralmente un ecosistema, por lo que también deberán incluirse en la planeación actividades de recuperación de agua y suelo, así como actividades que favorezcan la conectividad y la conservación del hábitat para la fauna. Es importante destacar que la restauración vegetal es un proceso que se desarrolla a largo plazo (por lo menos, un aproximado de 25 años), ya que involucra subprocesos complejos para volver al estado original que tenía el ecosistema antes de la perturbación.

La recuperación vegetal se podría implementar en carreteras que atraviesen por áreas que no sean reservas naturales, pero que presenten un alto grado de conservación. En esta situación sólo se recuperan algunas funciones de los ecosistemas y una menor diversidad de especies que cuando se tiene por objetivo la restauración. La mayor parte de las especies recuperadas forman parte de la vegetación secundaria y sólo se incluirían algunas especies primarias de la comunidad vegetal conservada. La recuperación vegetal de un sitio puede llevar una década o un poco más de tiempo.

Cuando las carreteras atraviesan por zonas de cultivos o pastizales es posible implementar una rehabilitación vegetal. En este caso no se trata de restablecer las condiciones originales del ecosistema, pero sí algunas funciones de éste a través de acciones como la formación de un corredor con vegetación que favorezca la alimentación y reproducción de insectos polinizadores. Para ello se pueden sembrar o plantar árboles, arbustos y hierbas nativas.

De igual manera, los sitios pueden ser reforestados cuando se localizan en zonas de cultivo, pastizales o si se trata de áreas de compensación en las que los propietarios estén interesados en destinar estos terrenos para obtener bienes maderables, frutales, realizar agroforestería, o bien estén interesados en recobrar alguna función ecosistémica como podría ser evitar la erosión o favorecer la infiltración de agua.

Muchos proyectos de revegetación establecen objetivos para obtener resultados a corto y largo plazos. A corto plazo, en muchos proyectos los objetivos inmediatos de la revegetación incluyen el control de la erosión y la protección de la calidad del agua a través de acolchados y cobertura vegetal. Un objetivo a largo plazo sería el establecimiento de una comunidad de plantas nativas, con especies que beneficien a los polinizadores, incrementando el hábitat para poder pecorear, reproducirse y anidar (FHA, 2019).

Para definir los objetivos de la revegetación se considera la ubicación del sitio a recuperar, el tipo de vegetación circundante y que se haya observado en los sitios de referencia, así como otros criterios como puede ser el tipo de uso que se le quiera dar al sitio a revegetar (p. ej. establecer una plantación silvícola, rehabilitar un corte para

la estabilización de un talud o restaurar un sitio propuesto como compensación ambiental). En la siguiente Tabla se muestran las acciones de revegetación que pueden realizarse de acuerdo con las distintas zonas de intervención que puede haber en una infraestructura carretera, más no es limitativa puesto que puede haber otras zonas donde se requiera realizar algún tipo de revegetación en un proyecto carretero.

Tabla 4
Acciones de revegetación que pueden realizarse de acuerdo con las diferentes zonas de intervención.

Acciones de revegetación	Estrato vegetal	Zonas de intervención en la infraestructura carretera
Rehabilitación	Herbáceo y arbustivo	Derecho de vía (cortes, taludes y rellenos), zona libre de obras permanentes, y zona federal en cauces fluviales. Bancos de préstamo y plantas de trituración. Plantas de asfalto. Bancos de tiro. Campamentos y patios de maquinaria. Túneles falsos y pasos para fauna. Áreas abandonadas por rectificación de trazo.
Reforestación	Arbóreo	Derecho de vía (cortes y rellenos [talud] y zona libre de obras permanentes). Bancos de préstamo y plantas de trituración. Plantas de trituración. Bancos de tiro. Campamentos y patios de maquinaria. Terrenos propuestos como compensación ambiental. Zona federal en cauces fluviales. Túneles falsos y pasos para fauna.
Restauración	Arbóreo	Terrenos propuestos como compensación ambiental.
Recuperación	Herbáceo y arbustivo	Bancos de préstamo. Plantas de asfalto. Bancos de tiro. Campamentos y patios de maquinaria. Áreas abandonadas por rectificación de trazo.

2.3 Análisis de la línea de base de la vegetación

Dependiendo de la infraestructura carretera a la que se asocie el plan de revegetación será el tipo de análisis de la línea base de la vegetación del sitio. Esto nos permite conocer cómo se encuentran los sitios antes de ser intervenidos por la infraestructura carretera, cómo serán afectados y qué acciones deberán de seguirse para realizar la recuperación de su cobertura vegetal y de sus funciones ecológicas.

En este sentido, el análisis de la línea base de la vegetación puede basarse en información proveniente de:

a) Consulta de información cartográfica referente al uso de suelo y vegetación.
b) Consulta de estudios previos del sitio o de la infraestructura carretera, tales como la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA), o el Estudio Técnico Justificativo (ETJ), entre otros, que contengan una línea de base de la vegetación.
c) Muestreos de sitios de referencia de la vegetación.

2.3.1 Consulta de información cartográfica de uso del suelo y vegetación

Previo a la visita de campo para realizar los trabajos de muestreo de los sitios de referencia es recomendable llevar a cabo una investigación bibliográfica de la zona de estudio, tomando como punto de partida el uso de suelo y vegetación que se reporta para el sitio, el cual puede ser consultado en diferentes fuentes bibliográficas tales como los datos vectoriales del uso del suelo y vegetación reconocidos por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la información cartográfica del Inventario Nacional Forestal y de Suelos elaborado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

Con la información obtenida se identifica la distribución de los diferentes tipos de vegetación natural e inducida de las áreas a intervenir, o ya intervenidas, por la construcción de otras obras relacionadas con la infraestructura carretera en estudio, asimismo, se identifican las características y las estructuras más relevantes de la vegetación del sitio.

Este acercamiento con el área de estudio servirá para elaborar la estrategia de muestreo en los sitios de referencia que se caractericen en campo, con la finalidad de elaborar la propuesta de ubicación de las unidades de muestreo acorde a cada uso del suelo o tipo de vegetación involucrado.

2.3.2 Estudios previos del sitio

Adicional a la consulta de información sobre el tipo de uso de suelo y vegetación, se deberá recopilar información acerca de las condiciones previas del sitio a intervenir, es decir, anterior a la implementación de la infraestructura carretera. Será de utilidad contar con documentos como la MIA o el ETJ, entre otros estudios que contengan una línea de base de la vegetación e información de utilidad como:

- Usos que ha tenido el sitio antes de ser intervenido (p. ej. ganadería, agricultura, forestal, etc.).

- Tipos de vegetación.
- Perturbaciones que haya sufrido el sitio (p. ej. incendios).
- Tipo de fauna (p. ej. polinizadores).
- Edafología.
- Hidrología.

2.3.3 Muestreos de sitios de referencia

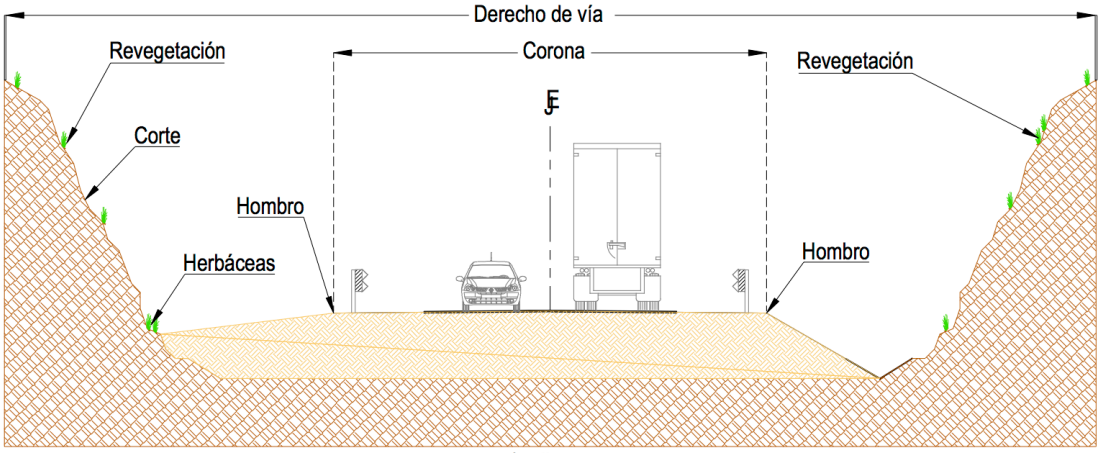
Para establecer la línea de base de la vegetación se recomienda realizar muestreos en sitios de referencia, los cuales son áreas de las diferentes comunidades vegetales que se localizan a lo largo del trazo de la carretera o vía férrea, antes de su construcción, o posterior a ésta, cuando se trata de modernizaciones a la infraestructura carretera. Las comunidades vegetales presentes son el resultado de diferentes condiciones ambientales relacionadas con la topografía, el clima, la vegetación y los suelos, entre otros factores. El objetivo de evaluar las condiciones y la vegetación de los sitios de referencia es la elaboración de la lista de especies presentes en la zona, que servirá como guía para la selección de la paleta vegetal que será implantada en cada sitio mediante las "unidades de revegetación", que son las distintas áreas por recuperar en la infraestructura carretera.

Idealmente, la información resultante del muestreo del sitio de referencia debe indicar cómo una unidad a revegetar puede recuperarse de las perturbaciones a diferentes tiempos después de la construcción de la infraestructura carretera. Los muestreos de referencia sirven de ejemplos de las comunidades de plantas nativas, a partir de las cuales el especialista (preferentemente en botánica) que elabore el plan de revegetación puede seleccionar especies a utilizar en cada caso. Cada unidad de revegetación debe tener al menos un sitio de referencia correspondiente que sirva como modelo.

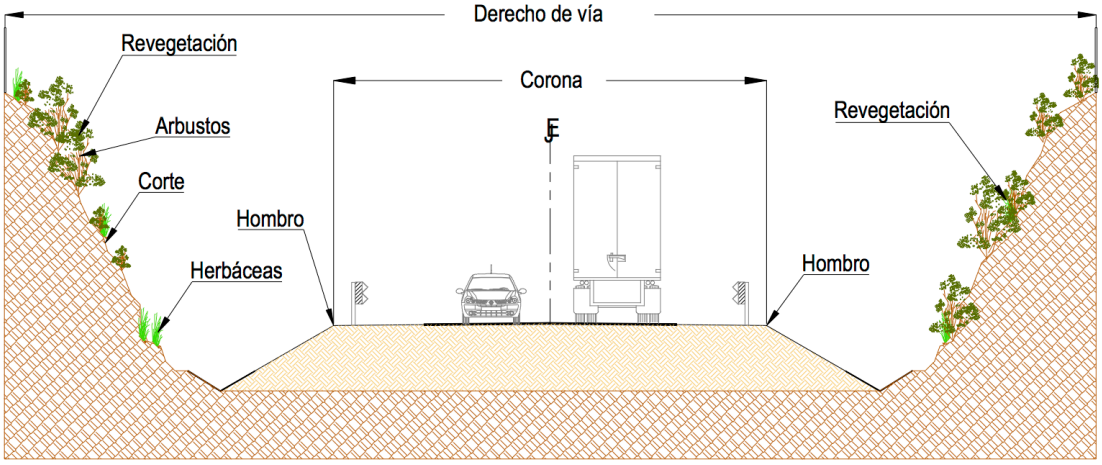
Existen dos tipos de sitios de referencia, los perturbados y los conservados. Los sitios de referencia perturbados pueden ser cortes y terraplenes en una carretera, los cuales tengan algunos años de haber recuperado su vegetación a lo largo del tiempo (sucesión ecológica), caminos abandonados, sitios talados, área de desechos, bancos de préstamo o depósito, u otras áreas afectadas por perturbaciones relevantes. Para la infraestructura carretera, los sitios de referencia perturbados son los más útiles porque representan a los sitios que son ecológicamente similares a las unidades de revegetación y se han recuperado de perturbaciones similares. Idealmente, el tipo de perturbación en un sitio de referencia debe coincidir con el tipo de afectación ocasionada por la infraestructura carretera en cuestión. Si se pretende revegetar un corte para la construcción de la infraestructura carretera, lo cual implica remover el suelo superficial, entonces de la misma forma, el sitio de referencia perturbado debe carecer de este suelo superficial (FHA, 2019).

Preferentemente se deben encontrar varios sitios de referencia perturbados que representen diferentes estados de sucesión ecológica del sitio a revegetar. Una unidad de revegetación idealmente estaría representada por un sitio de referencia recientemente perturbado (un año después de la perturbación), un sitio recuperado recientemente (5 a 25 años después de la perturbación), y un sitio completamente recuperado (más de 25 años después de la perturbación) (ver Figura 2).

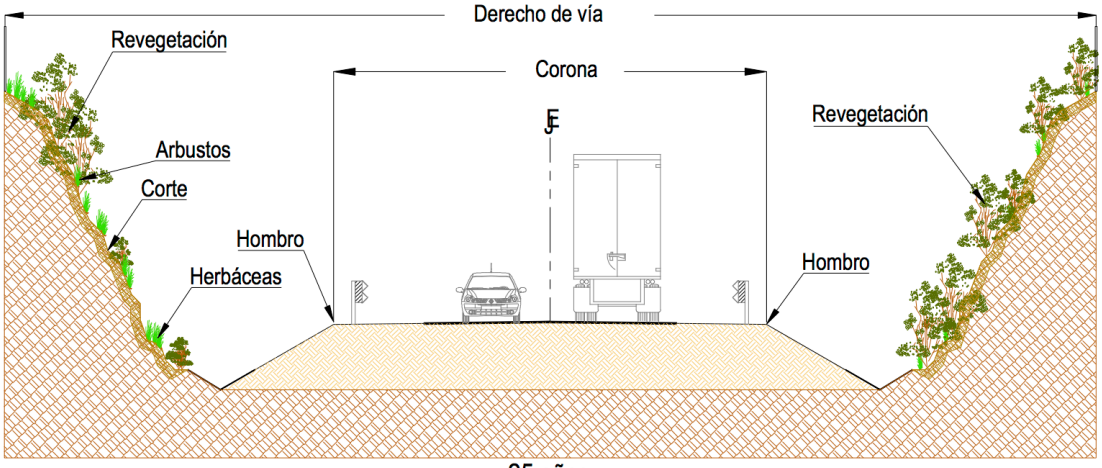
Figura 2
Dinámica de la sucesión ecológica en laderas.



1 año



5 años



25 años

Dibujos fuera de escala

Por su parte, los sitios de referencia conservados son sitios relativamente prístinos, carentes de perturbaciones relevantes y en los cuales la vegetación se encuentra bien conservada respecto a sus condiciones originales. Pueden ser utilizados cuando la restauración ecológica es el objetivo o cuando los sitios de referencia perturbados no están disponibles (FHA, 2019).

2.3.3.1 Información por recopilar con los muestreos de los sitios de referencia

La información que deberá ser recopilada en los muestreos de sitios de referencia está relacionada con la historia del sitio, los recursos naturales existentes, así como el manejo pasado y actual del suelo, así como aspectos relacionados con la topografía, la vegetación, el clima, y la hidrología. Los aspectos de suelo, clima e hidrología pueden ser consultados bibliográficamente, sin embargo, respecto a la vegetación, se recomienda que este componente ambiental sea siempre evaluado en campo al realizarse los muestreos de los sitios de referencia, como complemento al análisis de gabinete. La información compilada servirá para la selección de especies que serán utilizadas en la revegetación.

En este sentido, en los muestreos no es necesario realizar un inventario florístico completo, sino que deben enfocarse particularmente en conocer aquellas comunidades que sean de interés. Las comunidades vegetales son conjuntos de plantas caracterizadas por una fisonomía, estructura y composición florística particular en un lugar dado. La descripción y evaluación de las comunidades vegetales constituye un elemento indispensable para entender el funcionamiento de los ecosistemas en cualquier región.

Para los proyectos en los que ya se cuenta con una línea de base de la vegetación, por ejemplo cuando se tienen estudios ambientales ya hechos, se recomienda complementar la información con nuevos muestreos en campo para verificar y actualizar la información sobre las comunidades vegetales.

El objetivo de evaluar la vegetación en los sitios de referencia es documentar la estructura vegetal y hacer un listado con las especies a utilizar en los planes de revegetación, así como determinar la cantidad de plantas que se deberán propagar (comprar u otras formas de aprovisionamiento) de cada especie, además de obtener elementos cuantitativos de las variables a analizar por especie (p. ej. abundancia y área basal). Cuando esta evaluación se hace a través del tiempo, es posible medir o estimar los cambios en la composición y abundancia, usando especies o grupos de especies sensibles e indicadoras de estos cambios. Esta información es necesaria para resolver problemas ambientales, proponer acciones de gestión sostenible y establecer programas de restauración vegetal.

Los estudios de comunidades vegetales de los sitios de referencia son más relevantes si se contrastan comunidades con características o historiales de uso distintos. Se recomienda comparar zonas bien conservadas con otras que tienen algún tipo de alteración natural o antropogénica.

Algunos criterios por considerar en los estudios de comunidades vegetales son:

- Los procesos de sucesión, recuperación o restauración de hábitat o paisaje.
- La composición y diversidad de especies, en diferentes comunidades vegetales.

- Las poblaciones de algunas especies de interés (especies maderables, especies bajo algún estatus de protección, etc.).
- Los impactos producidos por causas naturales (incendios, derrumbes, etc.) o humanas (deforestación, tala de árboles, etc.) sobre la vegetación.

Respecto a la forma y tamaño de los sitios de muestreo, estos pueden tener la forma de cualquier figura geométrica o incluso pueden ser irregulares, pero las formas más utilizadas debido a su fácil establecimiento en campo son las circunferencias y los cuadrados (Emanuelli *et al.,* 2017). La forma de los sitios está determinada por dos criterios básicos, por un lado, que la relación perímetro/superficie del sitio debe ser la mínima, de este modo se consigue reducir los problemas que se presentan en los bordes de las parcelas para determinar si un árbol debe ser incluido o no; por otra parte, el número de vértices del sitio debe reducirse, siempre y cuando esto no suponga un inconveniente para su futura localización.

La forma que mejor se ajusta a los dos criterios descritos es la circunferencia, sin embargo, las parcelas circulares presentan dos grandes inconvenientes: los límites son difíciles de establecer y la dificultad aumenta proporcionalmente al tamaño del sitio. Al estar definidos por una sola referencia (su centro) su futura localización se complica cuando se pretende realizar evaluaciones sucesivas. Cuando no es viable el establecimiento de sitios de referencia circulares, la otra opción son los sitios de referencia cuadrados por varios motivos.

Se recomiendan las formas rectas, ya que los límites son fáciles de reconocer al estar marcados por líneas rectas con ángulos de 90 grados. Asimismo, estos sitios de referencia son sencillos de replantear con el empleo de cintas métricas y brújulas.

Figura 3
Delimitación de perimetral de sitio de muestreo.



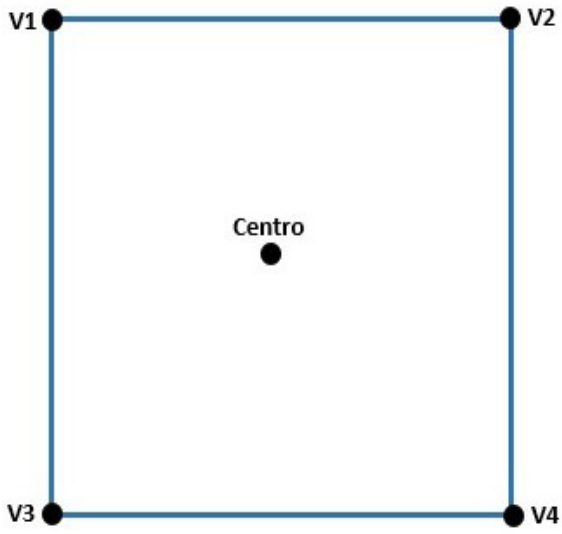
Fuente: Kerkus, S.A. de C.V.

Figura 4
Delimitación de sitio de muestreo con el uso de cinta métrica.



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

Figura 5
Esquema representativo del sitio de muestreo.



Los sitios de referencia cuadrados presentan una ventaja sobre los rectangulares al tener una relación perímetro/superficie menor. La localización posterior se facilita al contar con cinco puntos de referencia (sus cuatro esquinas y el centro).

Para la delimitación de los sitios de referencia se utilizan aparatos GPS (sistema de posicionamiento global) que servirán para establecer la ubicación espacial de los vértices y estacas (preferentemente pintadas de color).

Figura 6
Delimitación de sitio de muestreo utilizando GPS, cuerda, cinta métrica y estacas.



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

2.3.3.2 Metodología para los muestreos de los sitios de referencia

A continuación se presenta la metodología para realizar los muestreos de los sitios de referencia.

A. Selección de tamaño de los sitios de referencia.

Tamaño para sitios de referencia circulares. En los inventarios de bosques templados de América del Norte, incluyendo México, y en el Noroeste de Europa, los sitios de referencia circulares son los más utilizados. Su aplicabilidad radica en la facilidad para delimitarlos, ya que, por la forma, incide menos el efecto de borde. Una vez establecido el centro del sitio de referencia circular se realizan radios hacia la periferia. Para la mayor parte de los trabajos de cuantificación de especies vegetales se pueden utilizar sitios de 500 m^2 (25.2 m de diámetro) esto para evaluar aquellas especies de forma de vida arbórea que se encuentren ubicadas en el dosel primario. Los arbustos se registran en superficies de aproximadamente 200 m^2 (16 m de diámetro) considerando aquellas especies que formen parte del dosel medio y las hierbas en una superficie de 5 m^2 (2.5 m de diámetro) dando como resultado el registro de especies del dosel bajo, considerando principalmente especies de forma de vida herbácea.

Figura 7
Esquema representativo de un sitio de referencia circular.

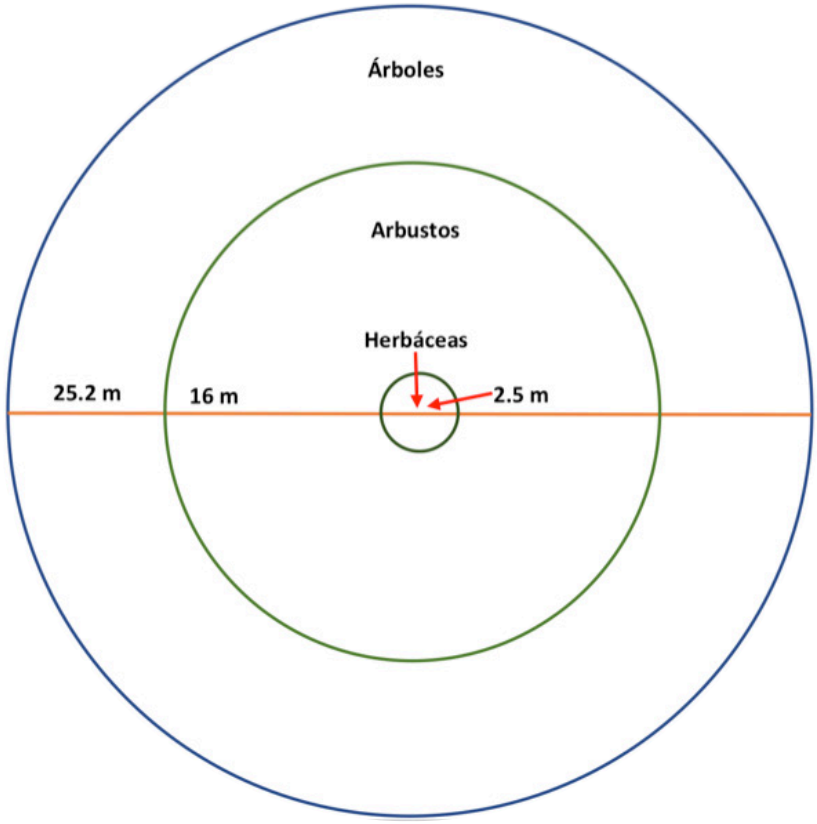
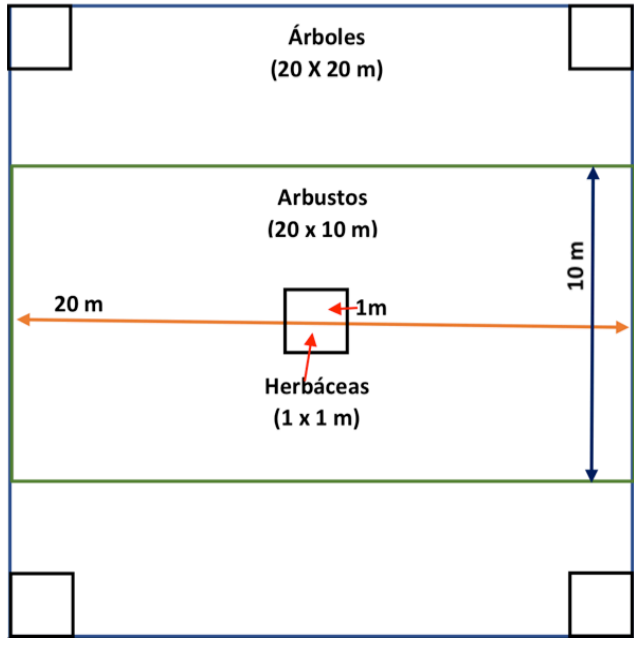


Figura 8
Esquema representativo de un sitio de muestreo cuadrado.



Tamaño para sitios de referencia cuadrados. Se recomienda establecer sitios de referencia cuadrados en áreas con vegetación densa y donde se tiene escasa visibilidad, ya que son fácilmente delimitables. Un sitio de referencia de 400 m^2 puede localizarse y trazarse midiendo 20 m para marcar sus bordes. Los arbustos se registran en superficies de aproximadamente 200 m^2 (20 x 10 m de largo) y las herbáceas en una superficie de 5 m^2, divididos en cinco cuadros de 1 x 1 m colocados en los extremos y centro del cuadro mayor.

El tamaño de los cuadrantes puede variar dependiendo del tamaño del sitio de referencia y del tipo de ecosistema a analizar (Tabla 5).

Tabla 5
Tamaño (m^2) recomendado que pueden tener los cuadrantes para los trabajos de cuantificación de especies en los diferentes ecosistemas y estratos vegetales.

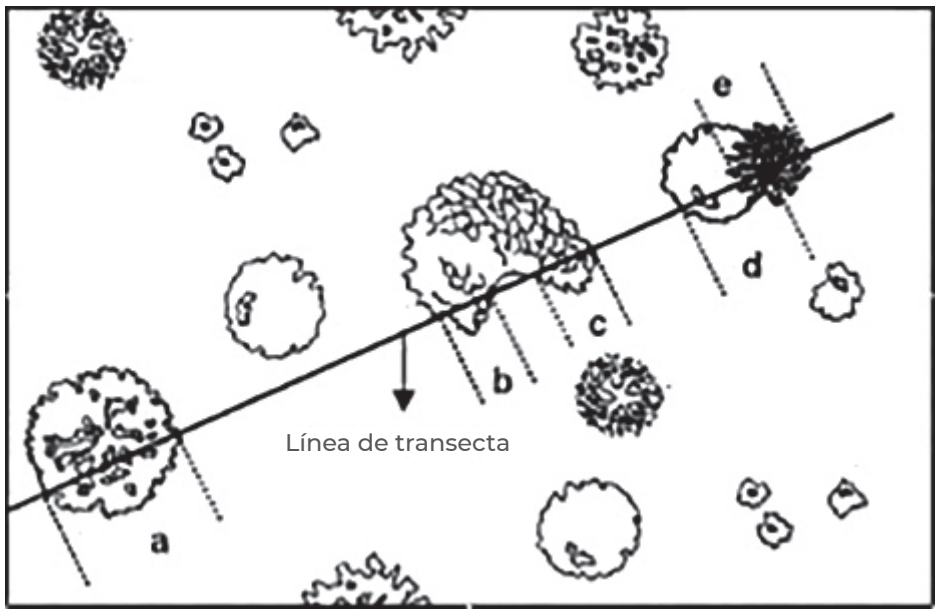
Ecosistema	Estrato de vegetación	Tamaño de cuadrante (m^2)
Turberas, pedregales	Musgo	0.01-0.1
Pastizales, páramo	Herbáceas	1-2
Matorrales	Arbustos de bajo porte	4-16
Matorrales	Arbustos altos	16-25
Bosques, selvas	Árboles	100-1000

B. Métodos para estimar la cobertura vegetal.

Líneas de intercepción o transecta. También conocidas como líneas de Canfield, en este tipo de muestreo se utilizan líneas a través de la comunidad vegetal a estudiar. Para estimar la cobertura de cada especie en la comunidad, se mide la distancia sobre los transectos (en m o cm) que es interceptada por cada una de las especies. Con los datos obtenidos se puede valorar la mayoría de las variables calculadas con los sitios circulares y cuadrados. No se puede evaluar una superficie, por lo que no se puede extrapolar por hectárea.

El método de líneas de intercepción produce datos para cálculos porcentuales de abundancia, cobertura y frecuencia por especie. Este método puede ser utilizado para los distintos estratos de la vegetación, sin embargo, lo único que cambiará es la distancia que se tenga que considerar para cada uno de éstos, criterio que tendrá que ser considerado por el técnico o por las necesidades del muestreo. Es útil para estudiar la vegetación densa dominada por arbustos y para caracterizar la vegetación herbácea y de gramíneas.

Figura 9
Muestreo mediante línea de intercepción o línea de Canfield.



Fuente: Martella *et al.* (2012).

Para tomar las mediciones de árboles y arbustos se puede considerar la línea a todo lo largo (50 m), en el caso de las herbáceas se puede emplear un tramo más corto de 10 m. Conviene utilizar una cinta métrica y para calcular la frecuencia hay que dividir la cuerda en varios tramos de la misma longitud. En cada intervalo se registra la presencia de cada especie. Para obtener los datos de cobertura, en cada intervalo se mide la distancia que abarca la cobertura de cada especie (o su proyección si es una hierba alta o un arbusto), es decir, el largo del segmento de la línea que es interceptado por la planta, o plantas de cada especie. Se recomienda obtener la información de cada estrato por separado.

Para la medición de árboles y arbustos es importante realizar lo siguiente:

- **Medición de diámetro normal y basal del tronco**. El diámetro es la variable habitualmente medida expresada en cm (Cancino, 2012). En árboles en pie, la medición más común es del diámetro normal o diámetro a la altura del pecho (DAP), que se realiza a 1.30 m sobre el nivel del suelo. En arbustos de porte bajo con ramificaciones se mide el diámetro basal, el cual se obtiene a 10 cm del suelo o en algunas ocasiones en la base.

Figura 10
Medición de diámetro normal con el uso de forcípula forestal.



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

- **Medición de altura.** Es la longitud de la línea recta que va desde el suelo (base del fuste) hasta el extremo de la yema terminal del fuste expresada en metros. La medición de árboles (juveniles) y arbustos menores a 3 m se pueden hacer con un flexómetro y para los que miden hasta 8 m con la vara telescópica. Las alturas también se pueden medir indirectamente mediante instrumentos ópticos denominados hipsómetros que miden alturas con base en tangentes de ángulos. Para realizar la medición el operario se posiciona a cierta distancia del árbol, apunta con el instrumento a la base y nuevamente al extremo de la punta de la copa, realizando la lectura.

Figura 11
Medición de altura de árboles con el uso de distanciómetro.



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

- **Medición del diámetro de la copa**. El diámetro de la copa es la longitud que mide su proyección horizontal. Ya que estos no son círculos perfectos se miden en dos direcciones. Para su medición se toma en consideración la proyección de los extremos de la copa sobre el suelo, midiéndose con una cinta métrica. La medida final del diámetro de la copa es el promedio de las dos mediciones registradas:

$$K = k_1 + k_2/2$$

Donde:

K = diámetro promedio de la copa.

k_1 = diámetro mayor.

k_2 = diámetro menor.

C. Identificación de las especies vegetales.

Es importante que se realice una correcta identificación taxonómica de los ejemplares botánicos que se utilizan en los análisis de los datos. Una identificación errónea puede demeritar en alto grado el trabajo. En el campo se debe recolectar el material botánico de las especies presentes en el área, registrar todos los datos que sean de utilidad, almacenar o procesar el material para su posterior identificación y, finalmente, identificar las plantas utilizando claves taxonómicas adecuadas.

Los datos que se registran en el área de estudio se pueden clasificar en generales y particulares. Los primeros consisten en nombre del colector, fecha, nombre del lugar, coordenadas, elevación, tipo de suelo, tipo de vegetación y características del terreno (plano, pedregoso, inundado, perturbado). Los datos particulares se refieren a los de la planta o muestra recolectada, es decir, forma biológica (árbol, arbusto o hierba), forma de vida terrestre (erecta, postrada, rastrera, epífita, trepadora, etc.) o acuática (enraizada emergente, enraizada sumergida, enraizada de tallos flotantes, enraizada de hojas flotantes o libre sumergida), tamaño, color de la flor, forma y color del fruto, abundancia, nombre común, etcétera.

El material físico recolectado se puede llevar directamente al laboratorio para su identificación y generalmente se recomienda procesarlo. Las muestras deben prepararse y preservarse, de esta manera se contará con ejemplares de referencia de soporte al estudio. Las plantas pueden deshidratarse utilizando una prensa botánica, la cual consiste en dos rejillas de madera acompañadas de láminas de cartón corrugado, papel periódico y una cuerda o cinturones para su compresión. Si las plantas son pequeñas (hasta 30 cm de altura) se puede colectar todo el ejemplar, en otros casos sólo se cortan porciones representativas que contengan tallos, hojas, flores y frutos, y se recomienda obtener varios ejemplares por especie. El registro de las plantas debe contener el nombre del colector y el número de colecta en el papel periódico, otros datos se amplían en una libreta de campo.

La identificación de materiales se realiza en un laboratorio, utilizando normalmente un microscopio estereoscópico y literatura especializada que contenga claves taxonómicas del grupo o familia botánica del ejemplar examinado. En algunos casos será necesario consultar a especialistas o enviar el material a un herbario para su determinación o corroboración taxonómica. Es importante usar la nomenclatura actual y vigente de los nombres científicos. Para ello se recomienda consultar páginas de referencia confiables como *Trópicos del Missouri Botanical Garden* (http:/www.tropicos.org) o *The Plant List* (http:/www.theplantlist.org).

Una vez que las especies han sido determinadas, se desarrollará una lista de especies a utilizar para la revegetación. Un buen método para compilar esta lista es realizar una tabla de entrecruzamiento representativa para cada sitio de referencia, que caracterizará las especies de plantas en cada unidad. Esta lista será utilizada para seleccionar las especies de plantas que se propagarán en vivero, particularmente aquéllas que estén en peligro de extinción o en alguna categoría de riesgo y también servirá para identificar a las plantas que deberán controlarse por ser invasivas.

La lista de especies debe incluir los siguientes atributos y consideraciones (FHA, 2007; FHA, 2019):

- Nombre común y científico de la especie. Debido a que los nombres comunes cambian dependiendo de la región, es importante que la lista incluya el nombre científico y común para cada especie.
- Unidad de revegetación en las que se establecerán.
- Entorno ecológico. Las plantas son identificadas por el entorno ecológico en el que se encuentran más frecuentemente. Ciertas condiciones de temperatura (fría, templada y cálida) y humedad (seco, fresco y húmedo) proporcionan un perfil del entorno ecológico.
- Amplitud. La amplitud ecológica es la recurrencia de una especie a través de una amplia variedad de entornos ecológicos. Una especie que se encuentre en todos los entornos ecológicos tendrán una alta amplitud ecológica, mientras que una especie que se encuentra únicamente en un entorno ecológico tendrá una baja amplitud.
- Abundancia. Es la cantidad, dominancia o cobertura de una especie encontrada en una unidad de revegetación.
- Forma de vida de una especie. 1) árbol, 2) arbusto, 3) pasto anual, 4) pasto perenne, 5) hierba anual, 6) hierba perenne, 7) especies de humedales.
- Natividad. Las especies nativas son aquéllas que se distribuyen de manera natural en una región (Therrell *et al.*, 2006). Muchas de ellas han prosperado por siglos o milenios en el ecosistema del cual son nativas. Las plantas nativas pueden ser árboles, arbustos, hierbas, enredaderas, que pueden ser utilizadas para embellecer el paisaje. Si los objetivos de la revegetación son la recuperación o la restauración vegetal, entonces se deberán excluir todas las especies exóticas.
- Plantas exóticas. Es necesario identificar a las especies introducidas, invasivas y que pudieran ser nocivas para las comunidades nativas de México.
- Especies bajo riesgo. Las plantas estatales o federalmente protegidas se localizan en la NOM-059-SEMARNAT-2010. Existen cuatro categorías, especies bajo protección especial (Pr), especies amenazadas (A), especies en peligro de extinción (P) y especies probablemente extintas en el medio silvestre (E).
- Especies amenazadas. Este criterio tendrá que considerar lo dispuesto en la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES), el cual, es un acuerdo internacional concertado entre los gobiernos, y tiene como finalidad velar por que el comercio internacional de especímenes de animales y plantas silvestres no constituya una amenaza para la supervivencia de las especies.
- Sucesión ecológica. Determinar el estado al que una especie está más frecuentemente asociada: 1) temprana, 2) media, 3) tardía, 4) madura. Visitar los sitios de referencia y las áreas adyacentes en diferentes años después de la perturbación, ayudará a tener un mejor entendimiento de cómo cada especie se adecua dentro de la sucesión ecológica (ver ejemplo en la Tabla 6, en la cual se indica el estado de sucesión ecológica para cada especie identificada en los muestreos de sitios de referencia).
- Especies de batalla. Son especies nativas que están localmente adaptadas y que cumplen con las siguientes características: 1) tienen una alta amplitud eco-

lógica, 2) alta abundancia y 3) son relativamente fáciles de propagar. Estas especies deben evaluarse en función de los objetivos de la infraestructura carretera. Aquellas especies que tienen una alta amplitud y abundancia son buenas candidatas para ser utilizadas. De estas especies, es necesario evaluar su facilidad de propagación (incluye la capacidad del material vegetal, su facilidad para ser propagada en vivero o su producción de semillas en campo, la viabilidad de las semillas al almacenarse y la supervivencia de los materiales vegetales una vez que son establecidos en la infraestructura carretera). Para estas especies de batalla se deberá incluir lo siguiente:

- Disponibilidad de materiales vegetales. Semillas, plantas y esquejes frecuentemente son colectados en el campo y llevados a un vivero para la propagación de las plantas. Las especies que son difíciles de obtener o colectar no son buenas candidatas para esta categoría.
- Vivero y producción de semillas. Las especies que son difíciles de propagar en el vivero, o en campos productores de semillas, no son buenas candidatas para ser especies de batalla. Cabe mencionar que las nuevas técnicas para propagar especies nativas mejoran constantemente.
- Longevidad. Muchas especies de plantas poseen semillas ortodoxas que pueden almacenarse por un tiempo determinado. Sin embargo, algunas especies poseen semillas recalcitrantes que pierden la viabilidad rápidamente (p. ej. género *Quercus*). Es necesario conocer el tiempo en que las semillas pierden la viabilidad para hacer una planeación adecuada.
- Establecimiento en campo. La facilidad que tiene un material vegetal para establecerse en el sitio del proyecto determinará si es una especie de batalla. Algunas especies no cumplen bien con este supuesto porque la latencia de las semillas debe romperse y es difícil obtener buenas tasas de germinación. Otras especies que fueron plantadas como juveniles, experimentan un estrés al momento de ser trasplantadas, lo que significativamente reduce la supervivencia de las plantas.
- Costos. El costo total para el establecimiento de plantas nativas en la infraestructura carretera es la medida más fácil para determinar si una especie es buena candidata para tener el estatus de especie de batalla.
- Grupo de trabajo. Un grupo de trabajo es una mezcla de especies de batalla, desarrollado para una función ecológica específica o un objetivo de manejo. Una de las mejores formas para desarrollar grupos de trabajo es acomodar la lista de especies por los aspectos ecológicos y de sucesión. De esta forma se ensamblarán especies en grupos que existen en la naturaleza. A partir de estos grupos, se desarrollan los grupos de trabajo con base en los objetivos de la infraestructura carretera, como puede ser el mejoramiento del hábitat de polinizadores, control de plantas invasivas, mejoramiento visual, manejo de sitios conservados, y control de la erosión. El desarrollo de estos grupos de trabajo es frecuentemente la base para generar las mezclas de semillas y plantas para cada unidad de revegetación.
- Especies especialistas. Son especies que pueden ser propagadas, sin embargo, debido a la falta de información de cómo propagar sus semillas, se

lleva más tiempo y los costos son mayores. La infraestructura carretera que se ubique en microclimas o suelos especiales puede requerir una única mezcla de especies especialistas (p ej. especies presentes en humedales). Si sólo una pequeña cantidad de especies especialistas es necesaria, entonces deberían considerarse otros métodos de propagación. Éstos incluyen la colecta de materiales vegetales en el campo o hacer crecer plántulas en un vivero.

D. Estimaciones de variables absolutas y relativas por especie.

Cálculo de abundancia. Se define como el número de individuos por unidad del área o unidad de hábitat (Mackenzie *et al*., 1998). Este resultado se expresa para especies arbóreas y arbustivas por ha y para herbáceas por ha o m^2. La abundancia absoluta difiere de la relativa en que la absoluta se refiere al número de individuos por especie, mientras que la relativa es la proporción de cada especie en el número total de individuos (Lamprecht, 1990). Una vez que se tiene cuantificado el número de individuos registrados de cada especie se tiene que extrapolar por hectárea.

Una vez calculados los valores absolutos de la abundancia se estiman los relativos. Para la estimación de la abundancia relativa se emplea la siguiente fórmula:

$$ARi = (Ai/\sum Ai) * 100$$

Donde:

ARi = abundancia relativa de la especie i respecto a la abundancia total.

Ai = número de individuos de la especie i.

∑Ai = sumatoria del número de individuos de todas las especies.

Cálculo de dominancia. Se refiere a la extensión de área cubierta, espacio ocupado o grado de control de una comunidad, por una o más especies. La dominancia generalmente está determinada por el área de la copa (Lamprecht, 1990). El uso de la variable dendrométrica, área basal, puede ser un adecuado sustituto para el cálculo del valor de dominancia. La dominancia absoluta de una especie se define como la sumatoria del área basal individual, expresada en m^2. La dominancia relativa se determina como la proporción de una especie en el área basal total evaluada.

Una vez calculados los valores absolutos del área de la copa se estiman los valores relativos. Para la estimación de la dominancia relativa se emplea la siguiente fórmula:

$$DRi = (Di/\sum Di) * 100$$

Donde:

DRi = dominancia relativa de la especie i respecto a la abundancia total.

Di = dominancia absoluta de los individuos de la especie i.

∑Di = sumatoria de la dominancia de individuos de todas las especies.

Cálculo de frecuencia. Se define como el número de veces que una especie está representada, también se puede definir como el porcentaje de veces que ocurre una especie en los sitios de referencia. La frecuencia relativa de una especie está determinada como un porcentaje en la suma de las frecuencias absolutas de todas las especies. Esta variable define una variable de homogeneidad de un ecosistema (Lamprecht, 1990).

Una vez calculado el número de sitios en los que una especie se presenta se estiman los relativos. Para la estimación de la frecuencia relativa se emplea la siguiente fórmula:

$$FRi = (Fi/\sum Fi) * 100$$

Donde:

FRi = frecuencia relativa de la especie i respecto a la frecuencia total.

Fi = número de sitios en los que está presente la especie i.

∑Fi = sumatoria del número de sitios en el que están presentes todas las especies.

Cálculo del índice del valor de importancia. Para la caracterización horizontal de la comunidad vegetal se puede usar el índice del valor de importancia (Curtis y McIntoh, 1951). Este es el resultado de la suma de los valores porcentuales de la abundancia (N ha^{-1}), dominancia (m^2 ha^{-1}) y frecuencia; el valor determina la presencia de cada especie dentro de la comunidad. Este índice es fácil de interpretar porque las tres variables están dadas en valores porcentuales y el resultado final se da en una escala del 0 al 300.

$$IVI = \sum(ARi + DRi + FRi)/3$$

Donde:

ARi = abundancia relativa, la cual corresponde al número de individuos de una especie i multiplicada por 100, dividida entre el número total de individuos de la especie i (abundancia total).

DRi = dominancia relativa, la cual corresponde a la dominancia de una especie i multiplicada por 100, dividida entre la dominancia de todas las especies (dominancia total).

FRi = frecuencia relativa, la cual corresponde a la frecuencia de una especie i multiplicada por 100, dividida entre la frecuencia de todas las especies (frecuencia total).

E. Lista de especies vegetales obtenida de los muestreos de sitios de referencia.

La Tabla 6 describe un ejemplo de lista de especies vegetales obtenida a partir del muestreo de sitios de referencia. Tal como se observa, se deberá incluir información como la abundancia, medida en individuos por ha, la forma de vida, su distribución (si es nativa o exótica), su estatus en la NOM-059-SEMARNAT-2010, su estadio de sucesión ecológica y el tipo de clima en el cual se distribuyen de manera natural.

Tabla 6
Ejemplo de lista de especies vegetales obtenidas a partir de los muestreos de sitios de referencia, se utiliza para determinar la mezcla de especies y las cantidades de plantas a usar en cada unidad de revegetación.

Nombre científico	Nombre común	Sitio de referencia	Amplitud	Abundancia (individuos/ha)	Forma de vida	Distribución (nativa o exótica)	Protegida por NOM-059-SE-MARNAT-2010	Sucesión ecológica	Tipo de clima
Agave salmiana	Maguey	1	Media	500	Roseta herbácea	Nativa	No	Temprana	Templado-cálido
Buddleja cordata	Tepozán	1	Alta	1500	Árbol	Nativa	No	Temprana	Todos
Ipomea purpurea	Campana	1	Media	400	Enredadera	Nativa	No	Temprana	Templado cálido
Miravilis jalapa	Aretito	1	Media	300	Hierba	Nativa	No	Temprana	Templado-cálido
Pittocaulon praecox	Palo loco	1	Baja	600	Arbusto	Nativa	No	Temprana	Templado-cálido
Quercus rugosa	Encino	1	Media	800	Árbol	Nativa	No	Media	Templado-seca
Salvia mexicana	Tlacote	1	Media	2000	Arbusto	Nativa	No	Temprana	Templado-cálido
Sedum oxipetalum	Siempre viva	1	Baja	2000	Arbusto	Nativa	No	Temprana	Templado-cálido
Buddleja cordata	Tepozán	2	Alta	300	Árbol	Nativa	No	Temprana	Todos
Pinus montezumae	Pino	2	Media	800	Árbol	Nativa	No	Media	Templado-húmedo
Quercus laurina	Encino	2	Baja	400	Árbol	Nativa	No	Tardía	Templado-húmedo
Salvia fulgens	Mirto	2	Baja	1000	Arbusto	Nativa	No	Media	Templado-húmedo

2.4 Elección de sitios para la revegetación

Las actividades de revegetación están centradas en cinco grandes grupos de áreas: a) el derecho de vía, b) las áreas fuera del derecho de vía ocupadas temporalmente por las obras, c) los terrenos propuestos para revegetar como medida de compensación ambiental y d) las áreas abandonadas por rectificación de trazo.

A continuación se hace una descripción de estas áreas, así como la información que deberá considerarse para su revegetación.

2.4.1 Derecho de vía

El derecho de vía es definido como aquella superficie de terreno cuyas dimensiones fija la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, requerido para la construcción, conservación, modernización y, en general, para el uso adecuado de una carretera y de sus servicios auxiliares (*Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras*, 2018).

En el derecho de vía se realizan diversas actividades que modifican las áreas naturales y el paisaje, causando impactos ambientales negativos. 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 la construcción, son factores determinantes del impacto ambiental generado. La reposición de la vegetación de estas áreas es de vital importancia para recuperar parte de los servicios ecosistémicos que ofrecían antes de la construcción de la infraestructura carretera. Para ello, es necesario identificar los componentes de las obras de la infraestructura carretera que hacen susceptibles a los recursos naturales dentro del derecho de vía y que requieren de intervención para restablecer las funciones ecológicas y al mismo tiempo garantizar la seguridad de los usuarios.

2.4.1.1 Zonificación dentro del derecho de vía

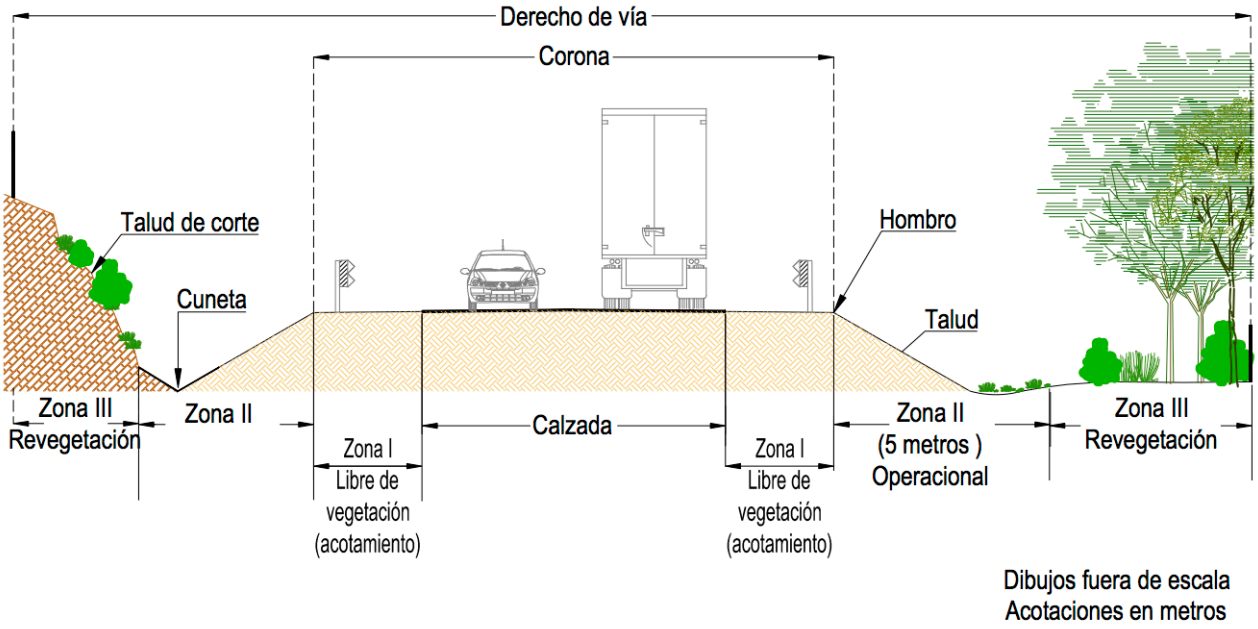
El derecho de vía se zonifica o divide en tres grandes zonas (desde un punto de vista de la vegetación que puede estar presente en éste), las cuales tienen características distintas de cobertura vegetal y tratamiento requerido a ciertas distancias del borde de la carretera. Las dimensiones de estas zonas, la vegetación y los tratamientos de mantenimiento varían dependiendo de las condiciones del derecho de vía y de cada carretera. Generalmente se contemplan tres zonas con diferentes tratamientos (ver Figura 12).

La zona I, denominada acotamiento, es la zona libre de vegetación. Se extiende desde el borde de la calzada hasta el hombro de la corona y está compuesta de pastos nativos bajos que deben ser podados.

La zona II es la zona operacional. Se extiende desde el hombro de la corona hasta alcanzar aproximadamente 5 metros de ancho, está compuesta por pastos, hierbas y arbustos de bajo porte, y por recomendación de la *Guía de Procedimientos y Técnicas para la Conservación de Carreteras en México* (DGST, 2014) se indica que *la hierba no debe sobrepasar los treinta centímetros de altura en una faja de 5 metros colindantes a la corona del camino*. La zona II permite dar mantenimiento al drenaje y requiere la remoción de especies arbóreas.

La zona III es la zona donde se debe implementar la revegetación. Se extiende desde el término de la zona II hasta el límite del derecho de vía y puede estar cubierta por pastos, herbáceas, arbustos y árboles. Esta zona generalmente no se poda y puede contener arbustos grandes y especies arbóreas.

Figura 12
Zonificación del derecho de vía.



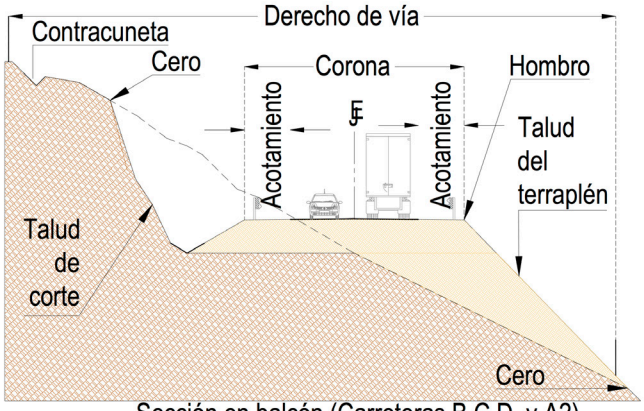
El mantenimiento de todas las zonas consiste en la remoción y el control de especies de plantas invasivas y la remoción de especies arbóreas en el caso de las zonas I y II. Algunas de las tareas básicas de mantenimiento son:

- Aclareo de la línea de visión. Los árboles y arbustos son frecuentemente removidos en las áreas donde se obstaculiza la línea de visión. En la fase de planeación se identificarán aquellas áreas no aptas para el establecimiento de árboles y arbustos en términos de visibilidad. Por lo tanto, se recomienda establecer en la zona II (operacional) pastos nativos, hierbas y arbustos bajos (30 cm o menos), los cuales pueden proporcionar una cobertura durable para estas áreas, sin afectar la línea de visión o la seguridad del usuario.
- Manejo de los árboles. Los árboles que alcancen un diámetro a la altura de pecho de 10 cm, se consideran objetos fijos que pueden causar serios daños, heridas y pérdidas de vidas humanas cuando un vehículo colisiona. Las masas de árboles cercanas al camino pueden proporcionar cobertura para los grandes mamíferos, pero no debe permitirse que crezcan en las zonas I y II.
- Protección de estructuras. La plantación de árboles de porte robusto cerca de las estructuras de las carreteras pueden ser un factor de riesgo durante eventos climáticos extremos, por lo que se recomienda analizar las propuestas de revegetación con base en los antecedentes climáticos en la zona de estudio.

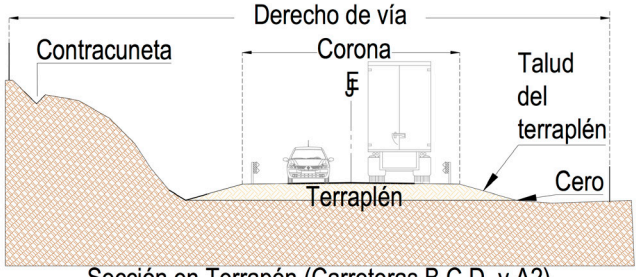
2.4.1.2 Áreas recomendadas para la revegetación

A continuación se describen las áreas recomendadas para la revegetación, las cuales se concentran dentro de las zonas II y III antes descritas.

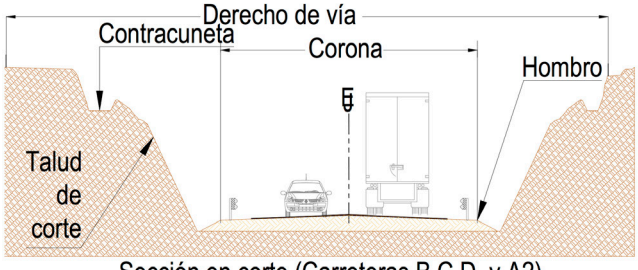
Figura 13
Secciones transversales típicas que ejemplifican los diferentes tipos de talud.



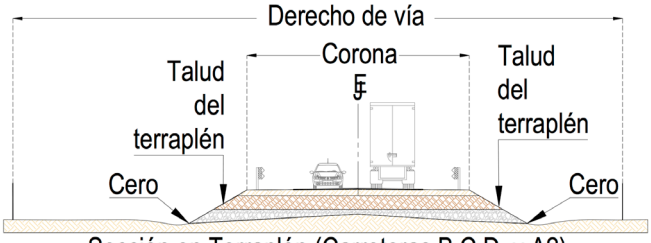
Sección en balcón (Carreteras B,C,D, y A2)



Sección en Terrapén (Carreteras B,C,D, y A2)



Sección en corte (Carreteras B,C,D, y A2)



Sección en Terraplén (Carreteras B,C,D, y A2)

Dibujos fuera de escala

A. Áreas de cortes y terraplenes.

Un talud en corte se genera por una excavación del terreno natural mientras que los taludes en terraplenes se forman como resultado de la colocación de material de relleno. El talud es la inclinación de la superficie de los cortes o de los terraplenes (*Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras*, 2018). Por su naturaleza e importancia para la seguridad vial de la infraestructura carretera, los taludes tienen que ser estabilizados para evitar derrumbes o deslizamientos, para lo cual, ciertas técnicas de revegetación pueden ser efectivas.

En la siguiente Figura se podrán observar algunos tipos de talud que regularmente se presentan en la infraestructura carretera.

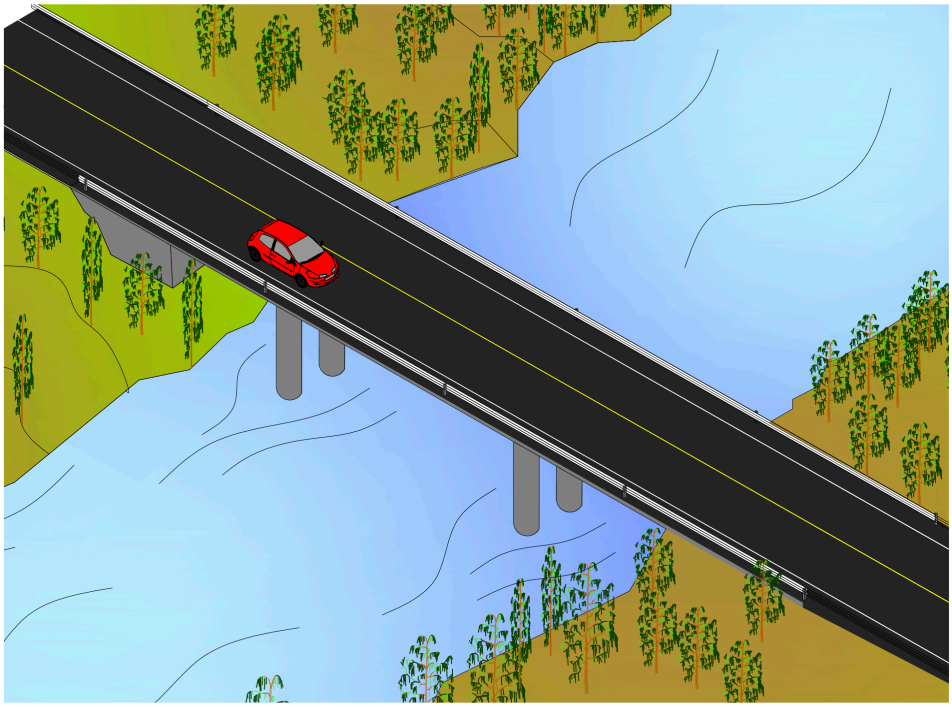
B. Área libre de infraestructura permanente dentro del derecho de vía.

Esta área es considerada la franja de terreno que queda exenta de todo tipo de infraestructura permanente, su ancho depende del derecho de vía considerado para ampliaciones futuras. La construcción de infraestructura carretera implica el desmonte total del derecho de vía, sin embargo, la franja libre de infraestructura queda desprovista de vegetación y, por consiguiente, expuesta a los procesos erosivos por la lluvia o el viento. Para revertir los impactos en estas áreas es recomendable implementar acciones de revegetación apegadas a la normatividad que la SICT contemple, esta área es ajena a cortes o terraplenes. Para ello, es necesario conocer la topografía, tipo de suelo, vegetación aledaña y ancho de la franja libre de infraestructura para así proponer las técnicas más efectivas que permitan el restablecimiento de la vegetación.

C. Área de cauces fluviales.

Entre las medidas de mitigación que han tomado relevancia en los resolutivos en materia de impacto ambiental sobresalen las de revegetación, reforestación o restauración vegetal de los márgenes de los cauces fluviales que interfieran con el derecho de vía de carreteras, con la finalidad de restablecer y proteger los flujos naturales de los escurrimientos. Por lo tanto, es importante llevar a cabo una adecuada fase de planeación y considerar la caracterización de la vegetación presente en la zona antes de ser intervenida, la calidad del suelo, las afectaciones antropogénicas y también la información hidrológica que incluya datos sobre las crecidas máximas que hayan presentado esos escurrimientos. En la Figura 14 se presenta un ejemplo de cómo una carretera guarda relación con los cauces fluviales, por consiguiente, es relevante proponer estas áreas para que se apliquen actividades de revegetación.

Figura 14
Área de cauce fluvial atravesada por la infraestructura carretera.



2.4.2 Sitios fuera del derecho de vía ocupados temporalmente por las obras de infraestructura carretera

Generalmente, al hablar de la construcción de carreteras suelen mencionarse los impactos de éstas dentro del derecho de vía (desmontes, despalmes, movimientos de tierra, excavaciones, terraplenes, cortes, compactaciones, pavimentación, construcción de puentes y túneles, drenaje, edificación, etc.). Sin embargo, cabe señalar que no todas las actividades relacionadas con la infraestructura carretera generadoras de impactos negativos al medio ambiente quedan ubicadas dentro del derecho de vía, ya que, en muchos casos, algunas de las que se ubican fuera de éste también son causales de impactos significativos sobre el medio natural y, en ocasiones, pueden llegar a ser superiores al impacto previsto por el objetivo principal de la infraestructura carretera.

Por lo tanto, la infraestructura fuera del derecho de vía necesaria para la construcción de carreteras debe ser considerada en las medidas de mitigación o compensación que se propongan. Algunas de las obras temporales que pueden encontrarse fuera del derecho de vía son las siguientes:

- Caminos de acceso temporales.
- Bancos de préstamo de materiales y plantas de trituración.
- Plantas de asfalto.
- Bancos de tiro.
- Campamentos y patios de maquinaria.

Por lo tanto, las áreas que sean ocupadas para el desarrollo de estas obras son consideradas en el presente Manual como sitios susceptibles de recuperar su cubierta vegetal después de cumplir su función. A continuación se hace una descripción de cada una de estas áreas y qué criterios se tienen que considerar para proponer estrategias de revegetación efectivas.

2.4.2.1 Caminos de acceso temporales

Estos caminos son habilitados cuando los predios del derecho de vía que serán ocupados por la construcción de las obras no cuentan con accesos que permitan el tránsito de los diferentes frentes de trabajo. Estos accesos son provisionales y cumplen con la función de permitir la comunicación del frente de la obra con el derecho de vía, facilitando el transporte de personal e insumos necesarios para ésta, el acceso a la maquinaria y los diferentes equipos para construcción, así como acceso para el desalojo de materiales de desecho fuera del sitio del proyecto.

Para revertir las afectaciones que provocan estos caminos de acceso temporales es necesario implementar acciones de revegetación, considerando como punto de partida el análisis de la siguiente información: uso de suelo y vegetación, grado de compactación del suelo, tipo de vegetación afectado y, con lo anterior, analizar si será requerido mejorar el suelo previo a cualquier actividad de revegetación. A continuación se presenta un ejemplo del tipo de caminos que normalmente se apertura para tener acceso a los frentes de trabajo (Figura 15).

Figura 15
Camino de acceso habilitado para llegar al frente de trabajo. Autopista Silao, en el estado de Guanajuato.



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

2.4.2.2 Bancos de préstamo de materiales y plantas de trituración

Los bancos de préstamo de materiales son las excavaciones a cielo abierto que se encuentran en estado natural en principio, donde los materiales son extraídos y procesados para ser utilizados comúnmente en la construcción de las carreteras, tales como balasto, gravas, arenas, etcétera.

Las plantas de trituración son espacios que se habilitan para la instalación de maquinaria que será usada para reducir el tamaño de los materiales rocosos que serán utilizados para los diferentes procesos de construcción de las carreteras.

Los sitios de bancos de préstamo de materiales presentan un alto impacto al medio ambiente, sin embargo, en muchas ocasiones no son rehabilitados luego de que dejan de producir agregados. Se recomienda que cuando estos sitios dejen de ser utilizados se contemple la implementación de actividades de revegetación, considerando factores ambientales como la topografía, la calidad del suelo, las características del drenaje superficial (antes y después a la explotación), así como las especies de plantas que se distribuyen en los alrededores y analizar si será requerido mejorar el suelo previo a cualquier actividad de revegetación. En la Figura 16 se presenta un ejemplo del tipo de bancos de materiales que regularmente se apertura en la construcción de las carreteras.

Figura 16
Banco de material. Libramiento de Silao, en el estado de Guanajuato.



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

2.4.2.3 Plantas de asfalto

Una planta de asfalto es un conjunto de equipos mecánicos y electrónicos en donde los agregados son combinados, calentados, secados y mezclados con asfalto para producir una mezcla asfáltica en caliente que debe cumplir con ciertas especificaciones y que se utiliza para la construcción de superficies de rodadura o carpetas. Estas plantas comúnmente son ubicadas en predios cercanos a las obras y desmanteladas una vez concluida la construcción.

Es recomendable que inmediatamente después del desmantelamiento de la planta se considere un programa de revegetación para revertir los posibles impactos ambientales que se pueden generar por su establecimiento y operación. Para elaborar el plan de acción es indispensable conocer el grado de compactación del suelo, la superficie de ocupación, el uso de suelo o tipo de vegetación previo al establecimiento de la planta de asfalto y las especies vegetales que se albergan en la zona aledaña. A continuación se presenta una fotografía de una planta de asfalto habilitada en un proyecto carretero en el municipio de Silao, estado de Guanajuato (Figura 17).

Figura 17
Planta de asfalto. Libramiento de Silao, en el estado de Guanajuato.



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

2.4.2.4 Bancos de tiro

Los bancos de tiro son las áreas sin vegetación en las que se confina el material excedente (desecho o desperdicio) que se obtenga del o los cortes durante la construcción de la carretera; en ocasiones también se dispone en estas áreas parte del material de despalme y desmonte. En la Figura 18 se observa un banco de tiro que fue habilitado en el municipio de Chalco, Estado de México.

Figura 18
Bancos de tiro. Chalco, en el Estado de México.



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

2.4.2.5 Campamentos y patios de maquinaria

Los campamentos de obras de infraestructura carretera son instalaciones provisionales para alojar al personal que labora en la construcción; constan de dormitorios, comedor y sanitarios, y en ellos se concentran las actividades del personal, generalmente, antes y después de la jornada laboral.

El área de campamentos por lo regular cuenta con espacio suficiente para guardar la maquinaria y los vehículos, mientras que, en algunos otros casos, cuenta con áreas específicas para oficinas, laboratorio de suelos, talleres, combustibles, almacenes de residuos, cocina, comedor y servicios sanitarios como letrinas, vestidores, duchas y guardarropa. Generalmente cuenta con instalaciones de energía eléctrica y de agua.

Al terminar la obra de infraestructura carretera, estas áreas suelen ser abandonadas sin considerar una rehabilitación o recuperación de su cobertura vegetal. Es necesario que al finalizar los trabajos de obra se desarrollen actividades de revegetación como medida de mitigación. Al igual que en otras áreas, para definir las mejores técnicas de revegetación es necesario conocer el grado de compactación del suelo, las especies vegetales presentes en las áreas aledañas, así como su topografía y el uso del suelo o vegetación que se desarrollaba previo a la apertura de los campamentos o patios de maquinaria. A continuación se presenta un ejemplo de un campamento construido para brindar servicios a una obra.

Figura 19
Campamentos. General Escobedo, en el estado de Nuevo León.



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

2.4.3 Sitios propuestos para revegetar como medida de compensación ambiental

Como parte de la regulación de los proyectos de construcción de carreteras, la legislación ambiental vigente en México solicita atender las disposiciones que indica la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, así como la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, mediante la gestión de su autorización ante la SEMARNAT. Las evaluaciones de los estudios en materia de impacto ambiental y cambio de uso de suelo en terrenos forestales consideran la implementación de medidas de mitigación y compensación, por lo que las promoventes de los proyectos están obligadas a proponer terrenos para llevar a cabo actividades de revegetación en áreas adicionales a las afectadas directamente por las obras. Estos compromisos son adquiridos, ya que en la mayoría de los resolutivos de autorización son descritos por la autoridad como condicionantes para los proyectos. La intención de que ciertas áreas sean condicionadas para llevar a cabo una compensación de los impactos del proyecto es que éstas sean revegetadas (según sea la solicitud de la autoridad ambiental) para tratar de recuperar la funcionalidad ecológica de los ecosistemas aledaños al área intervenida, los cuales se ven afectados directa o indirectamente por la construcción de la infraestructura carretera. Estas áreas de compensación deben ser gestionadas por la promovente. En otro apartado de este documento se brindan recomendaciones para la gestión de predios y sobre aspectos sociales relacionados que deberán ser tomados en consideración para realizar proyectos de revegetación exitosos.

Como parte del expediente de los estudios ambientales que se presentan a la SEMARNAT, para compensar las afectaciones que se generarán en la vegetación por la construcción de carreteras se debe adjuntar una propuesta de reforestación que se tendrá que desarrollar en predios inmersos en el Sistema Ambiental (SA), Sistema Ambiental Regional (SAR) o en la Cuenca Hidrográfica Forestal (CHF), según sea el caso. Estas propuestas tendrán que considerar las acciones necesarias para la recuperación de áreas degradadas y preferentemente, que den continuidad a ecosistemas con vegetación forestal en estado de conservación primario o secundario.

Para las propuestas preliminares de estas áreas se tiene que considerar los siguientes puntos: ubicación del predio respecto al SA, SAR o la CHF, la estructura de la vegetación en los parches remanentes, la compactación del suelo, la fragmentación del paisaje, la distribución potencial de especies, la salud forestal del entorno y la susceptibilidad de los predios ante actividades antropogénicas.

En la siguiente fotografía se puede observar un terreno con baja presencia de individuos arbustivos y arbóreos, sin embargo, la cobertura del estrato herbáceo está bien conformada, por lo tanto, es un área con potencial para ser revegetada, ya que la profundidad del suelo que se ha formado favorecería el desarrollo de las plantas que se establezcan.

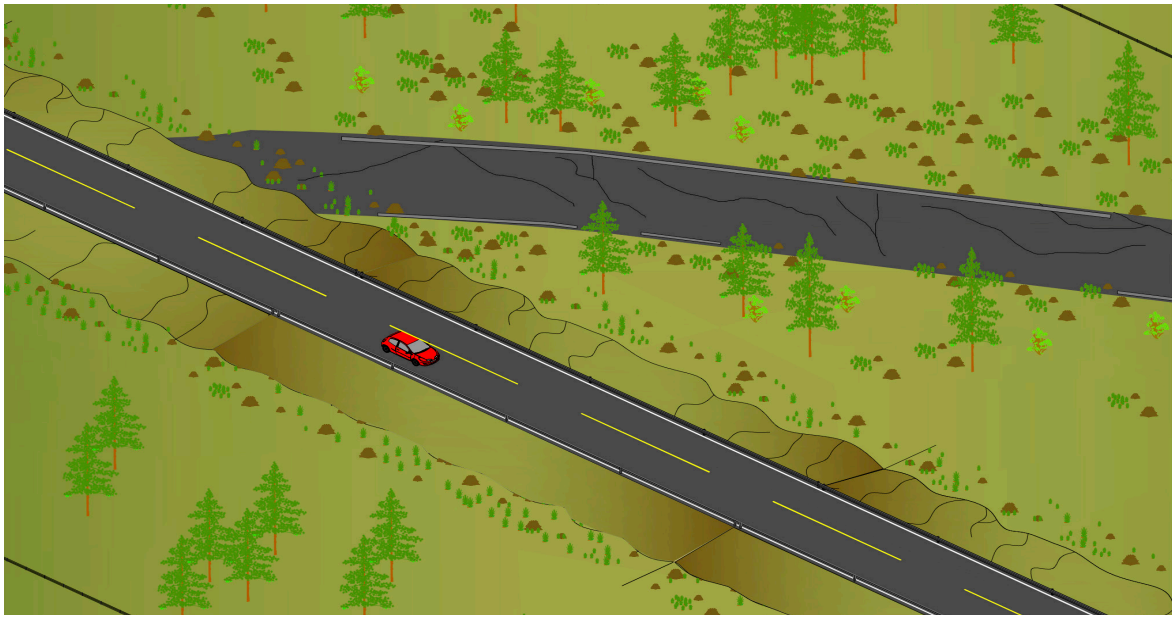
Figura 20
Zona idónea para ser reforestada por su baja cobertura arbustiva y arbórea.



2.4.4 Sitios abandonados por rectificación de trazo

Es común que se desarrollen proyectos de rectificación del trazo de la carretera, y que en ocasiones esos tramos rectificados sean abandonados sin darles ningún tipo de manejo para la recuperación vegetal. Estas áreas son susceptibles de revegetación y, en mayor o menor medida, es posible realizar actividades que permitan recuperar sus funciones ecológicas y minimizar los pasivos ambientales de las obras (estos pueden ser materiales contaminantes que se hayan dejado en los sitios intervenidos, o bien, infraestructura e instalaciones abandonadas, etc.). En la siguiente Figura se ejemplifica un área abandonada por la modernización de una carretera.

Figura 21
Rectificación de trazo de la carretera.



Es importante mencionar que las áreas propuestas en el presente Manual para realizar acciones de revegetación no son limitativas, ya que, dependiendo de la naturaleza de los proyectos de infraestructura carretera, pueden existir zonas de ocupación temporal y permanente no listadas en este documento, en las cuales puedan realizarse actividades de revegetación.

2.5 Caracterización de los sitios a revegetar

En este apartado se presentan los principales aspectos que deberán de identificarse y evaluarse en los sitios donde se pretenda realizar un proyecto de revegetación.

El momento de realizar la caracterización de los sitios a intervenir con proyectos de revegetación depende de la naturaleza del proyecto de infraestructura carretera y de los objetivos de la revegetación planteados. Por ejemplo, si se va a revegetar el derecho de vía, se recomienda hacer la caracterización previo a la intervención del proyecto (a través de los muestreos de sitios de referencia del trazo), y si se trata de un proyecto de revegetación en predios por compensación, la caracterización se realizará generalmente durante o posterior a la intervención de las obras.

También es importante considerar si se cuenta con una línea de base previa, ya que en muchas ocasiones los expedientes de los proyectos cuentan con información de estudios que se han realizado con anterioridad, datos que pueden servir de apoyo para elaborar las propuestas de revegetación.

2.5.1 Análisis de la estructura de la vegetación

La estructura de la vegetación puede entenderse como la constitución de un bosque en términos de especies, estratos, clases de edad o tamaño de árboles (Musálem y Fierros, 1996). Mediante manejo forestal, la estructura puede ser modificada a través del control de la composición del bosque, la densidad de plantación y las cortas de regeneración. Estas últimas consisten en la remoción del arbolado o parte de él, para mejorar y conducir el desarrollo de una unidad mínima de manejo hasta su madurez, así como para crear las condiciones para el establecimiento de plántulas que formen una nueva masa forestal. La finalidad de estas actividades es asegurar la continuidad de la masa forestal.

Los aspectos más importantes a considerar para analizar la estructura de la vegetación se describen a continuación.

2.5.1.1 Estructura vertical de la vegetación

La estructura vertical de la vegetación juega un papel muy importante en los proyectos de revegetación, ya que influye en la dinámica suelo-planta, modifica el ciclo de reproducción, disminuye el crecimiento de maleza y tiene una relación muy importante con factores abióticos, como la temperatura, la humedad y el aprovechamiento de la luz (Zehm *et al.*, 2003). Es también un factor determinante para definir el hábitat de las comunidades de origen animal, ya que permite la protección a las especies de diferentes estratos y define el comportamiento de las especies (Wood *et al.*, 2012, Hutto *et al.*, 2014).

De acuerdo con autores como Stark *et al*., (2015) y Musálem y Fierros (1996), mantener un bosque con una buena estructura vertical favorece en mayor grado la rehabilitación, debido a que la mezcla de especies las hace menos propensas a daños por plagas y enfermedades, y alberga una mayor cantidad de mesofauna; lo que hace más eficiente el reciclado de nutrientes, y la fauna silvestre se ve altamente beneficiada por una mayor cantidad de alimento y refugio.

2.5.1.2 Estructura horizontal de la vegetación

La estructura horizontal de la vegetación busca determinar los individuos que la conforman y su distribución espacial. Su caracterización se relaciona principalmente con la densidad, el tamaño de copa de los árboles y el diámetro de su tronco.

La cobertura del dosel desempeña un papel importante en la cantidad de luz solar que llega al suelo del bosque. Cuando se permite la penetración de una gran cantidad de luz solar al piso del dosel, puede llegar a desarrollarse un denso sotobosque. Como resultado de un dosel denso, muy poca cantidad de luz solar llegará hasta el suelo del bosque y, por consiguiente, el sotobosque será escaso (Musálem y Fierros, 1996).

Generalmente, los doseles se clasifican como: abiertos (del 10 al 39% del cielo está obstruido por los doseles), moderadamente cerrado (del 40 al 69% del cielo está obstruido por los doseles de los árboles) o cerrados (del 70 al 100% del cielo está obstruido por los doseles de los árboles).

2.5.2 Análisis del suelo

En materia ambiental, se considera al suelo como una mezcla de organismos vivos, materia orgánica, minerales, agua y aire, es necesario evaluarlo de forma particular para conocer con precisión su textura, estructura y consistencia. Por las características anteriores, suelen formarse diferentes tipos de suelo y éstos pueden ser de poca o gran profundidad, lixiviados o salinos, maduros o inmaduros, entre otras características, lo cual dependerá de condiciones como la topografía, el clima, la vegetación y la actividad humana.

Los suelos se encuentran estructurados por horizontes, los cuales son definidos como las capas del suelo que caracterizan a cada tipo de suelo. Al igual que existen muchos tipos de suelo y variaciones, también hay diversas capas horizontales que son típicas de todos los suelos. Los horizontes tienden a variar de un lugar a otro en el número, grosor individual, color y características físicas y químicas.

Para llevar a cabo la descripción y análisis del suelo en los sitios donde se llevará a cabo una revegetación es necesario realizar un perfil en el que se caractericen los horizontes de éste. En el perfil de suelo (corte vertical del suelo) se podrá observar el espesor y la secuencia de cada uno de los horizontes.

A continuación se describen las principales propiedades de los suelos que influyen en la supervivencia y el crecimiento de las plantas y que, por lo tanto, también influyen en el éxito del proyecto de revegetación. Aunque en este Manual se describe la importancia de las propiedades del suelo y cómo obtener los datos en campo, se recomienda consultar el manual de Siebe *et al.* (2016) para la descripción y evaluación edafoecológica de suelos *in situ*.

2.5.2.1 Propiedades físicas del suelo

Las principales propiedades físicas del suelo a considerar en la caracterización de los sitios a revegetar se describen a continuación.

A. Profundidad fisiológica del suelo.

Es la profundidad de los materiales del suelo favorable para la penetración de raíces de las plantas, por lo cual, es un factor limitante para la disponibilidad de humedad y nutrientes para las plantas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación [FAO], 2000). Puede determinarse mediante una barrena helicoidal y es recomendable tomar varias mediciones (dividir el predio en parte alta, media y baja) y promediar los valores obtenidos. Los suelos pueden clasificarse en cinco grupos con base en su profundidad, tal como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7
Clasificación de la profundidad fisiológica del suelo.

Clase	Profundidad (cm)
Muy somero	<15
Somero	15 – 30
Moderadamente profundo	30 – 70
Profundo	70 -120
Muy profundo	>120

Fuente: Modificado de Siebe *et al.*, 2016.

Cuanto más somero es un suelo, más limitados son los tipos de uso que puede tener y más limitada es su productividad, como se observa en la siguiente Tabla.

Tabla 8
Productividad de los suelos en función de la profundidad.

Profundidad de suelo utilizable por las raíces del cultivo (cm)	Productividad relativa (%)
30	35
60	60
90	75
120	85
150	95
180	100

Fuente: The Potash & Phosphate Institute (PPI) *et al.*, 1988.

B. Color del suelo.

El tono e intensidad de los horizontes del suelo son parámetros que permiten hacer inferencias sobre algunas características edáficas y procesos pedogenéticos. El color de un horizonte está determinado principalmente por el contenido de los ácidos húmicos y fúlvicos y compuestos de hierro y, en menor medida, del manganeso. Por lo tanto, el color refleja el contenido de materia orgánica y los procesos de oxidación y reducción en suelos.

La evaluación y monitoreo del suelo se hace por medio de tablas de color Munsell (Standard Soils Color Charts). Su determinación en campo se realiza tomando una muestra del horizonte y humedeciéndola para permitir la comparación de un horizonte con otro. La notación de las tablas de color es un designador sistemático con letras y números de las tres propiedades del color: matiz, intensidad y pureza.

Los suelos muestran gran variedad de aspectos, como la fertilidad o la composición química en función de los materiales que los conforman. La regla general, aunque con algunas excepciones, es que los suelos oscuros son más fértiles que los claros. La oscuridad suele ser el resultado de la presencia de grandes cantidades de humus. No obstante, en ocasiones los suelos oscuros o negros deben su tono a la materia mineral o a la humedad excesiva; en estos casos, el color oscuro no es un indicador de fertilidad.

Consideraciones sobre el color:

- Los suelos rojos o castaño-rojizos suelen tener gran proporción de óxidos de hierro que no han sido sometidos a humedad excesiva. Por lo tanto, el color rojo es, en general, un indicio de que el suelo está bien drenado y es fértil.
- Suelos amarillos o amarillentos tienen escasa fertilidad. Deben su color a óxidos de hierro que han reaccionado con el agua y son, de este modo, señal de un suelo intemperizado.
- Los suelos grisáceos pueden tener deficiencias de hierro u oxígeno en terrenos mal drenados, o un exceso de sales alcalinas, como carbonatos de calcio.

C. Textura del suelo.

Es una de las características más importantes del suelo y puede inferirse fácilmente en campo a través de la prueba del tacto. Para realizarla se humedece una pequeña muestra de la fracción fina del suelo (<2 mm) tomada del horizonte a caracterizar. Esta muestra no debe presentar exceso de humedad (capacidad de campo). Posteriormente, se observan las características de moldeado (consistencia y granulometría) de la muestra, presionándola y palpándola entre los dedos y moldeando esferas y rollos.

Existen diversas técnicas para el reconocimiento de la textura del suelo, en este Manual se recomienda enviar muestras para su análisis más preciso de textura en el laboratorio. La Norma Oficial Mexicana, NOM-021-SEMARNAT-2000, establece la determinación de la textura del suelo por el método de Bouyoucos, que consiste en la estimación de los porcentajes de arena, limo y arcilla presentes en la fracción mineral del suelo. Los porcentajes se determinan mediante la separación de las partículas y se clasifican de acuerdo con su diámetro. El tiempo de lectura es de 40 segundos para la separación de partículas mayores a 0.05 mm y de dos (2) horas para partículas de diámetro mayores a 0.0002 mm.

D. Rocosidad del suelo.

En materia ambiental, otro parámetro importante del suelo es la rocosidad, que es el material grueso del suelo en porcentaje de volumen (vol. %), es decir, material de tamaños mayores a 2 mm, claramente visibles en la palma de la mano al hacer la prueba al tacto. También puede estimarse este parámetro en la pared del perfil del suelo a través de la comparación con tablas.

E. Estructura del suelo.

Es la manera en que las partículas del suelo se agrupan en fragmentos mayores. La estructura del suelo en materia ambiental es un término que se refiere a la agregación de las partículas primarias en partículas compuestas. La estructura influye determinantemente en el balance hídrico y térmico, en la aireación del suelo e indirectamente en la actividad biológica, el potencial de rendimiento y la erosionabilidad.

Un agregado natural (ped) es producto de las interacciones de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los suelos en contraste con un terrón (masa pequeña y compacta de tierra u otra materia), que es producto de un disturbio (por ejemplo, labranza) o un fragmento que se forma por la ruptura de la masa del suelo a través de superficies naturales lábiles. También difiere de una concreción, debido a que esta última es producto de la concentración local de compuestos que cementan irreversiblemente un conjunto de granos.

En el campo es posible describir la macroestructura, la cual se analiza en láminas delgadas a través del análisis de microscopio en el laboratorio. Al describir la estructura en campo se hace referencia a la forma y disposición de los agregados, su tamaño (clase) y su grado de desarrollo o agregación.

F. Estabilidad de agregados del suelo.

En materia ambiental, la estabilidad de agregados es una medida de la vulnerabilidad del suelo frente a fuerzas externas destructivas. Un agregado consiste en diversas partículas del suelo ligadas entre sí, y aquéllos que se resisten a las fuerzas del agua son denominados agregados estables al agua (AEA). En general, cuanto mayor sea el porcentaje de agregados estables, tanto menor será la erodabilidad del suelo.

Los agregados del suelo son producto de la comunidad microbiana del suelo, de los componentes orgánicos y minerales del suelo, de la naturaleza de la comunidad de plantas en la superficie y de la historia del ecosistema. Son importantes con relación al movimiento y almacenaje de agua del suelo, a la erosión, al desarrollo radicular y a la actividad de la comunidad microbiana. Pueden formarse, desintegrarse y re-agregarse periódicamente y su destrucción es el primer paso hacia el desarrollo de costras y el sellado superficial, ya que impiden la infiltración del agua e incrementan la erosión.

La agregación del suelo puede variar a lo largo de determinados periodos de tiempo, tales como una estación o un año. En campo, es posible evaluar este factor depositando aproximadamente 10 agregados de diámetros entre 3 y 10 mm en una cápsula de porcelana y saturándolos con agua. Tras hacer rotar suavemente durante 30 segundos la cápsula en la palma de la mano se evalúa el grado de descomposición de los agregados según la Tabla siguiente.

Tabla 9
Grado de descomposición de los agregados del suelo.

Grado de descomposición	Evaluación
No hay descomposición o sólo fragmentos grandes	Muy alta
Dominan los fragmentos grandes sobre los pequeños	Alta
Igual número de fragmentos grandes y pequeños	Mediana
Dominan los fragmentos pequeños sobre los grandes	Moderada

Fuente: Modificado de Siebe *et al.*, 2016.

G. Capacidad de retención de agua del suelo.

La cantidad de agua que puede retener un suelo depende de factores como el volumen y la distribución del tamaño de los poros (porosidad), lo cual a su vez depende de la textura, la materia orgánica, la estructura y la densidad aparente. La cantidad de agua que un suelo puede retener contra la gravedad se denomina capacidad de campo (CC), en este caso, los microporos y los mesoporos estarán saturados con agua.

El agua retenida en los microporos no puede ser absorbida por la mayoría de las plantas, y se le denomina punto de marchitez permanente (PMP). La cantidad de agua que el suelo puede proporcionar a las plantas se denomina capacidad de retención de agua disponible o capacidad de campo (dCC). El agua disponible se calcula como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente del sustrato (Siebe *et al.,* 2016).

Con los datos de textura, densidad aparente y contenido de materia orgánica, puede calcularse el volumen total de poros, la capacidad de aireación (macroporos), la capacidad de retención de agua disponible para las plantas (mesoporos) y la capacidad de campo (mesoporos más microporos). Para más información sobre este procedimiento, consultar el Manual de Siebe *et al.*, 2016.

H. Densidad aparente del suelo.

En materia ambiental la densidad aparente de un sustrato es la masa de una unidad de volumen de sustrato seco. En el volumen se incluyen sólidos y poros, y el nivel óptimo fluctúa alrededor de 0.9 g/cm^{-3}. Los sustratos con un espacio poroso grande tienen densidades aparentes bajas, cualquier factor que afecte el espacio poroso afecta la densidad aparente. Los suelos compactados tienen poca agua disponible para las plantas, además, la firmeza del suelo se considera alta cuando presenta más de los 2000 kPa, nivel límite para la penetración de las raíces. La manipulación y las perturbaciones en los suelos urbanos ocasionadas por actividades de construcción o remodelación ocasionan generalmente compactación en los horizontes superficiales y algunas veces llegan a afectar los horizontes más profundos (Nurul-Nasyitah Shukor *et al.,* 2015).

La densidad aparente puede ser estimada de manera semicuantitativa en campo, en la pared del perfil, como se muestra en la siguiente Tabla.

Tabla 10
Valores estimados de densidad aparente para suelo seco.

Característica (válido para suelo seco)	Densidad aparente (g/cm³)			
	Arenas y limos	Francos	Arcillosos	Evaluación
El cuchillo sólo se puede introducir bajo fuerzas mayores, el suelo casi no se desmorona.	1.9 a 2.1	1.8 a 1.9	1.6 a 1.8	Alta
El cuchillo sólo se introduce con dificultad 1 a 3 cm en el suelo, la muestra se desmorona en pocos fragmentos que sólo se pueden partir con la mano con dificultad.	1.8	1.6	1.4	Mediana
El cuchillo se puede introducir en el suelo con poco esfuerzo, la muestra se desmorona en pocos fragmentos, los cuales pueden partirse con la mano en fragmentos más pequeños.	1.6	1.4	1.2	
Al presionar suavemente el suelo se desmorona en muchos fragmentos.	1.4	1.2	1	Baja
La muestra se desmorona totalmente al tomarla con la mano, se ven muchos poros gruesos y muy gruesos.	1.2	<1		

Fuente: Modificado de Siebe *et al.*, 2016.

Nota: En caso de que el contenido de materia orgánica sea mayor a 2%, la densidad aparente deberá reducirse 0.03 g/cm³ por cada porcentaje de materia orgánica.

En caso de la presencia de aluminio activo, consistencia grasosa del suelo y tixotropía (desintegración súbita del agregado al presionarlo entre los dedos pulgar e índice), la densidad aparente deberá reducirse entre 0.2 y hasta 0.5 g/cm³, según la intensidad a la reacción del aluminio activo.

I. Penetrabilidad de raíces.

La penetrabilidad de las raíces es la resistencia que presenta el suelo a la penetración de raíces y está íntimamente ligada a la densidad aparente, y, por lo tanto, denota las posibilidades reales que tienen las raíces para su desarrollo en el horizonte. Algunas de las limitantes que las raíces encuentran son la rocosidad, las densidades aparentes altas, la escasez de poros gruesos y la presencia de estructura desfavorable (laminar, columnar y prismática). La penetrabilidad de raíces se reporta en dm² y se incluyen todos los horizontes en los cuales se observen más de una raíz fina. La

intensidad de las raíces se evalúa contando las raíces finas en un área representativa dentro de un horizonte de 1 dm^2. A continuación, se presenta una Tabla con los rangos a evaluar en la penetrabilidad de raíces en el suelo.

Tabla 11
Rangos por evaluar en la penetrabilidad de raíces en el suelo.

Raíces finas/dm^2	Evaluación
<1	Nula
1-2	Muy baja
3-5	Baja
6-10	Mediana
11-20	Alta
21-50	Muy alta
<50	Extremadamente alta

Fuente: Modificado de Siebe *et al.*, 2016.

J. Porosidad del suelo.

Los suelos, como los sedimentos, agregados y la mayoría de las rocas, contienen diferentes números de poros de diámetros variados, dependiendo de su textura, densidad aparente, estructura y contenido de materia orgánica. Al espacio que ocupan todos los poros del suelo, se le conoce como volumen total de poros.

En este sentido, los poros se pueden encontrar llenos de aire o agua, la retención del agua va en función de la ley de capilaridad y de adsorción a superficies fijas, de manera que cuanto más estrecho sea un capilar más alto subirá el agua dentro de él y más grande será la fuerza con la que el agua sea retenida.

Para que la planta pueda tomar el agua del suelo, deberá de aplicar fuerzas de succión mayores a las fuerzas de retención con las que el agua se encuentra adsorbida al suelo. De esta manera tenemos que, si un suelo cuenta con una porosidad y retención del agua, se podrá garantizar el crecimiento adecuado de la vegetación, por ello este es un indicador adecuado para la caracterización de sitios y es recomendable que esta actividad también se realice durante el monitoreo posterior a la revegetación, ya que con ello se podrá saber si la revegetación que se realizará es exitosa o no.

La evaluación de este rubro incluye todo tipo de poros, grietas, canales de lombrices y raíces. Debe describirse su abundancia, tamaño dominante, distribución y forma de acuerdo con la siguiente Tabla.

Tabla 12
Evaluación de los poros en el suelo.

Abundancia de los poros del suelo		
Abundancia	**(<2 mm)(>2 mm)**	**Distribución**
Pocos	1 a 50 $dm^{21-5/dm2}$	Dentro de agregados: la mayoría de los poros está dentro de los agregados.
Comunes	51 a 200/$dm^{21-5/dm2}$	Fuera de los agregados: la mayoría de los poros están entre las caras de los agregados.
Muchos	> de 200/$dm^{21-5/dm2}$	
Tamaño		**Forma**
Micro	< 0.075 mm	Vesiculares: aprox. esféricos, no elongados. Intersticiales: de formas irregulares. Tubulares: aprox. cilíndricos.
Muy finos	0.075 – 1 mm	
Finos	1 – 2 mm	
Medianos	2 – 5 mm	
Gruesos	> 5 mm	

Fuente: Modificado de Siebe *et al.*, 2016.

K. Compactación del suelo.

En materia ambiental la compactación del suelo es un proceso mecánico que genera un aumento de la densidad por la reorganización de las partículas del suelo como respuesta a la aplicación de fuerzas externas, y afecta principalmente a la capa superficial del suelo, ya que en esta sección se almacena la mayor cantidad de nutrientes y es en la cual se desarrolla la mayor cantidad de raíces.

La compactación reduce la permeabilidad de las raíces, disminuye la capacidad de retener agua disponible para las plantas y afecta también el drenaje al impedir el libre movimiento del agua. Al disminuir la porosidad del suelo se reduce el crecimiento de las raíces y el desarrollo de la fauna del suelo (FAO, 2000; FAO, 2009). Ante procesos de compactación también se disminuye la permeabilidad del suelo, lo que ocasiona que las plántulas sufran estrés hídrico e impide el desarrollo radical a profundidad forzando a las raíces a crecer en los horizontes superficiales, y también se incrementa el escurrimiento superficial y la erosión del suelo.

El grado de compactación del suelo está determinado principalmente por el espesor y naturaleza de la hojarasca, el contenido de materia orgánica, la textura, la estructura y el contenido de humedad del suelo.

Para tener una idea del nivel de degradación física del suelo y en específico del grado de compactación, se utiliza el índice estructural “IE” (Pieri, 1995). El IE se determina como la relación entre el contenido de materia orgánica y la fracción mineral del suelo, con base en la siguiente ecuación:

$$IE = \% MOS / (\% Limo + \% Arcilla) \times 100$$

Los resultados de IE inferiores a 5 indican suelos degradados, IE con valores de 5 a 7 suelos con alto riesgo a la degradación física por encostramiento o compactación, valores de IE de 7 a 9 se presentan en suelos con moderado riesgo a la degradación y valores de IE mayores a 9 indican suelos estructuralmente estables.

2.5.2.2 Propiedades químicas del suelo

Las principales propiedades químicas del suelo a considerar en la caracterización de los sitios a revegetar se describen a continuación.

A. Materia orgánica del suelo.

En materia ambiental, sabemos que la materia orgánica (MO) del suelo la conforman principalmente los restos vegetales y animales parcialmente descompuestos y sin descomposición. El material orgánico bien descompuesto recibe el nombre de "sustancias húmicas". La materia orgánica mejora la condición física del suelo, aumenta la infiltración del agua, disminuye la erosión y aumenta el potencial productivo.

La MO contiene cerca de 5 % de nitrógeno total (N), y funge como reserva de este elemento, también es fuente de otros nutrientes como fósforo (P), magnesio (Mg), calcio (Ca), azufre (S) y micronutrientes (FAO, 2009; PII *et al*., 1988).

El contenido de materia orgánica depende de los factores formadores del suelo: clima, vegetación, relieve, material parental y el tiempo. El contenido de MO en los horizontes superficiales puede estimarse en campo con el color del suelo en húmedo (obtenido con una tabla Munsell), la textura y el pH del suelo. Esta estimación se basa en la suposición de que el color del suelo (valor) es resultado de la mezcla de sustancias orgánicas de color oscuro y minerales de color más claro (FAO, 2009). La estimación de la acumulación de la materia orgánica en los horizontes superficiales se puede hacer tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- No debe realizarse la estimación en horizontes superficiales con bajos contenidos de materia orgánica, ya que esto llevará a resultados erróneos.
- Si el material parental es de color obscuro la estimación llevará a una sobreestimación del contenido de materia orgánica.
- Si el horizonte contiene cantidades significativas de pirita (FeS), también se sobreestimará el contenido de materia orgánica. La presencia de pirita se puede comprobar adicionando a la muestra unas gotas de HCl al 10%. Si se trata de pirita se percibirá un olor a huevo podrido.

Los valores de referencia para clasificar la concentración de la materia orgánica en los suelos se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 13
Clasificación de la concentración de materia orgánica en los suelos.

Clase	Materia orgánica (%)
Muy bajo	<1
Bajo	1 – 2
Medio	2 – 4
Medio alto	4 – 8
Alto	8 - 15
Muy alto	15 - 30
Extremadamente alto	>30

Fuente: Modificado de Siebe *et al.*, 2016.

B. pH del suelo.

El término pH significa "*potentia hydrogenii*" y se refiere al logaritmo negativo de la concentración de H^+ en el agua. Las soluciones con un pH <7 son ácidas, aquellas con pH>7 son básicas, y con pH=7 son neutras. El agua neutra contiene 10-7 moles/litro de H^+ y la misma cantidad de OH^-. El producto de las dos concentraciones siempre será 1014 moles^2/litro^2. Cuando se añaden iones OH^-, el producto de los iones se mantiene sin cambios, pero la concentración de H^+ disminuye y el pH aumenta (y viceversa). El pH en los suelos debe oscilar entre 6.5 y 7.5, que es el intervalo en el que se absorben la mayor cantidad de nutrimentos esenciales (Havlin *et al.,* 1999).

El pH determina en gran medida la forma y la disponibilidad de nutrimentos del suelo. Además, afecta la actividad y diversidad de las poblaciones de microorganismos edáficos de los cuales dependen muchos de estos procesos (Pär, 2004). Por otra parte, el agua en las áreas urbanas fluye por materiales sintéticos como el asfalto, concreto y mampostería, disolviendo substancias de estas superficies y absorbiendo otras traídas por la deposición de contaminantes (Yilmaz *et al*., 2008). Estas substancias son acarreadas y depositadas en los suelos, ocasionando reacciones que tienden a aumentar el pH, lo que afecta a las plantas que están adaptadas a condiciones edáficas ácidas. Debe tenerse en cuenta que un pH elevado puede ocasionar deficiencias nutrimentales y un incremento en la solubilidad de substancias tóxicas.

El valor de pH permite hacer inferencias en relación con la disponibilidad relativa de nutrimentos y también controla importantes procesos pedogenéticos. En campo, generalmente se mide con papel indicador. Para ello se le agregan a unos gramos de muestra aproximadamente el doble en proporción de solución de $CaCl_2$ 0.01 M (1:2.5), la determinación se realiza después de agitar la muestra y esperar por lo menos 15 minutos. En la Tabla siguiente se establecen los rangos de evaluación del pH.

Tabla 14
Rangos de evaluación y especificaciones en las mediciones del pH.

pH	< 3	4	5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	>
Evaluación	Extremadamente ácido	Muy fuertemente ácido	Fuertemente ácido	Moderadamente ácido	Ligeramente ácido	Muy ligeramente ácido	Muy ligeramente alcalino	Ligeramente alcalino	Moderadamente alcalino	Fuertemente alcalino

Fuente: Modificado de Siebe *et al.*, 2016.

C. Salinidad del suelo.

En materia ambiental, la salinidad de los suelos se considera como uno de los factores de evaluación más importante, ya que los suelos con altas concentraciones de sodio afectan el crecimiento de las plantas. Con base en información publicada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se considera que la mayoría de los suelos con elevadas concentraciones de sales presentan una conductividad eléctrica superior a los 4 Ohms/cm. En este sentido, los suelos con alta presencia de sales afectan la capacidad de asimilación de nutrientes por parte de las plantas, así como la actividad microbiana del suelo.

Un suelo es considerado salino cuando la conductividad eléctrica de su extracto de saturación (contenido de sales solubles en agua provenientes de un suelo) es mayor de 4 mS/cm; un porcentaje de sodio intercambiable menor a 15 y un pH menor de 8.5. Las sales acumuladas contienen aniones de Cl-, $SO4_2$-, HCO_3- y $CO3_2$-, y cationes de Na+, Ca^2+ y Mg^2+. Los suelos sódicos tienen una cantidad de sodio intercambiable mayor al 15%, una conductividad eléctrica menor a 4 mS/cm y un pH mayor a 8.5 (Havlin *et al.*, 1999).

2.5.3 Análisis de la disponibilidad de nutrientes esenciales en el suelo

Existen 13 elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, clasificados como macronutrientes y micronutrientes, dependiendo de su abundancia en las plantas (Marschner, 2012). Los macronutrientes son el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre, mientras que los micronutrientes son el cloro, hierro, boro, manganeso, cinc, cobre y molibdeno (Havlin *et al*., 1999; Marschner, 2012).

A continuación, se describen las funciones y procesos más relevantes en los que actúan los macronutrientes.

Nitrógeno (N). A pesar de que el 78% de la atmósfera terrestre está constituida por nitrógeno en forma gaseosa (N_2), frecuentemente éste limita el crecimiento de las plantas. El nitrógeno es absorbido en forma de ion amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-), y constituye entre el 1 y 5% del peso seco de los tejidos vegetales. El nitrógeno prove-

niente de los residuos animales y vegetales, las tormentas eléctricas y la combustión, se combina con el H_2 y el O_2, permaneciendo en la materia orgánica del suelo. La mineralización de nitrógeno implica que es descompuesto en formas disponibles para las plantas como el amonio, que es absorbido por las raíces. Generalmente, la absorción de nitrato se ve favorecida por pH bajos. El nitrato debe reducirse a amonio para llevar a cabo sus funciones como nutrimento.

El nitrógeno es parte integral de la clorofila, necesaria para realizar la fotosíntesis. Cuando existen deficiencias en nitrógeno, el crecimiento de las plantas se ve interrumpido, manifestándose con la presencia de clorosis en las hojas (Havlin *et al.* 1999; Marschner, 2012). En la materia orgánica estable, la relación carbono / nitrógeno (C/N) fluctúa entre 9 y 12. Las relaciones altas de C/N promoverán la inmovilización del nitrógeno. Si los materiales orgánicos tienen una relación C/N menor a 20, usualmente hay una liberación de nitrógeno mineral. Éste será proporcionado a las plantas después que los microorganismos mueran y el nitrógeno sea liberado (Chaves *et al.,* 2007).

La reserva de nitrógeno puede estimarse a partir del contenido de materia orgánica, que es casi la única fuente de N en el suelo, y de la clase de mantillo (tipos de humus) que presente el suelo, la cual implica diferencias en la relación C/N.

La evaluación de algunos macronutrientes se realiza por medio de la definición de mantillos, los cuales se describen como las manifestaciones morfológicas típicas del humus de los suelos y su distribución a profundidad. Los diferentes tipos de mantillos se distinguen por la actividad biológica que presentan, tal es el caso de la dinámica de descomposición de la materia orgánica, el tipo de sustancias húmicas que los componen y la secuencia, espesor y estructura de sus horizontes. Para cada tipo de mantillo se distinguen horizontes orgánicos de material depositado en la superficie (horizontes L y O) y un horizonte mineral rico en materia orgánica (Ah).

A continuación, se realiza la descripción de los mantillos típicos en los suelos (Siebe *et al*., 2016).

- **Mull.** Secuencia de horizontes: L – (Of) – Ah. Los horizontes orgánicos sobre la superficie del suelo son de espesores muy pequeños o incluso están ausentes en ciertos periodos, en caso de que la descomposición biológica sea muy eficiente. Si falta el horizonte Of, el espesor del horizonte Ah es generalmente mayor de 8 cm, si está presente el horizonte Of, el horizonte Ah presenta espesores mayores a 10 cm (a menudo de 5 a 7 cm). La estructura del horizonte Ah es generalmente de tipo migajón o granular, su contenido de materia orgánica es alto y la densidad de raíces es muy alta. Generalmente se presenta una alta actividad biológica y su balance de nutrimentos se considera eutrófico con una reacción ligeramente ácida a neutra y una relación C/N menor a 18.
- **Moder.** Secuencia de horizontes: L – Of - Oh – Ah. Los horizontes orgánicos sobre la superficie son varios y están presentes en todo el año, su espesor varía entre 2 y 8 cm. El espesor de los horizontes orgánicos generalmente es menor que el horizonte Ah. Los límites entre horizontes son generalmente difusos, se separa claramente al horizonte Ah del horizonte orgánico suprayacente. En el horizonte Of los restos vegetales disminuyen con la profundidad, mientras que las sustancias humificadas aumentan y presenta una lámina tenue. El horizonte Oh muestra una alta densidad de raíces muy finas. La actividad de la meso

y macrofauna es moderada y la descomposición de la hojarasca es lenta. El balance de nutrimentos se considera mesotrófico, la reacción es ácida y la relación C/N está entre 18 y 29.

- **Mor (o Rohhumus).** Secuencia de horizontes: L – Of – Oh – (Ah) o (Ae). Los horizontes orgánicos sobre la superficie son varios y están presentes durante todo el año, su espesor es generalmente mayor que el horizonte Ah, los límites entre horizontes son claros y los horizontes son fácilmente separables. El horizonte Oh se deja partir en fragmentos angulosos y presenta laminación muy fina. Muestra una mayor densidad de raíces gruesas que mantillos de tipo moder. La meso y macrofauna está casi ausente. La descomposición de la hojarasca es muy lenta y ocurre principalmente en los horizontes superficiales. Se favorece la formación de sustancias húmicas móviles que pueden ser translocadas con el agua que se infiltra en el perfil. El balance de nutrimientos se considera como oligotrófico, la reacción es fuertemente ácida, los contenidos de P, N y Ca son bajos y la relación carbono/nitrógeno es mayor a 29.

Para la estimación, primeramente, deberá calcularse la cantidad de humus presente en 1 m^2 de suelo dentro del espacio radical efectivo, multiplicando el contenido de materia orgánica en porcentaje por la densidad aparente (d.a. en g/cm^3=kg/m^3) por el factor de corrección de piedras y el espesor del suelo en decímetros.

Cantidad de humus en (kg/m²) = % m.o. *d.a. kg/dm³*((100-%piedras/100))* espesor dm

Después se calcula la reserva (Nt) y la disponibilidad (Nd) de nitrógeno por medio de las siguientes Tablas.

Tabla 15
Cálculo de la reserva y la disponibilidad de nitrógeno en función del tipo de mantillo.

Mull (C/N) = 10:1	Nt (kg/m^2) = humus * 0.050	Nd (g/m^2) = humus (kg/m^2) * 0.25
Moder (C/N) = 20:1	0.025	0.08
Mor (C/N) = 30:1	0.015	0.03

Fuente: Modificado de Siebe *et al.*, 2016.

Tabla 16
Cálculo de la reserva y la disponibilidad de nitrógeno total y nitrógeno disponible.

Nt (kg/m^2)	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	0.5 - 1.0	1.0 – 2.0	>2
Nd (g/m^2)	0.1 – 2	2 – 4.5	4.5 – 12	12 - 80	>80
Evaluación	Baja	Mediana	Medio alta	Alta	Muy alta

Fuente: Modificado de Siebe *et al.*, 2016.

Fósforo (P). El fósforo en las plantas se encuentra en una proporción que va de 0.1 a 0.5%, y es absorbido en forma de $H2PO_4$- y $HPO4_2$-. La absorción del primero es mayor en pH bajos, mientras que la del segundo ocurre a pH altos (arriba de 7.2, Havlin *et al.*, 1999). La función del fósforo en las plantas es el almacenamiento y la transferencia de energía, en donde el ATP es convertido en ADP (fosforilación). El fósforo es un componente estructural de los ácidos nucleicos, coenzimas, nucleótidos, fosfoproteínas, fosfolípidos y azúcares fosfatadas. Una gran cantidad de fósforo se encuentra en las semillas y frutos, por lo que se considera esencial para su formación. Además, está asociado al aumento en el crecimiento de las raíces (Marschner, 2012).

Los síntomas de deficiencia de fósforo se evidencian por una coloración púrpura en las hojas (Havlin *et al.* 1999; Marschner, 2012). El fósforo no es tan abundante en el suelo como el nitrógeno o el potasio. La cantidad de fósforo en el suelo oscila entre 0.005 a 0.150%, del cual sólo una pequeña porción está disponible para las plantas. El fósforo orgánico representa aproximadamente el 50 % del fósforo total y en muchos suelos varía entre 15 y 80%. El contenido de fósforo en la materia orgánica del suelo varía de 1% a 3% (Havlin *et al.*, 1999), por lo cual, la materia orgánica humificada es un reservorio importante de fósforo. El tamaño de este reservorio puede estimarse a partir de la cantidad de humus que presenta un suelo, en la Tabla siguiente se presentan los parámetros de calificación.

Tabla 17
Cálculo del reservorio de fósforo a partir de la cantidad de humus que presenta el suelo.

Mull	P_{mo} (g/m²) = humus (kg/m²) * 10
Moder	* 1.5
Mor (Rohhumus)	* 0.8

Fuente: Modificado de Siebe *et al.*, 2016.

La evaluación de la cantidad de fósforo movilizable a partir de la mineralización de la materia orgánica del suelo se realiza considerando los valores que se presentan en la Tabla siguiente (considerando todos los horizontes en un espacio radical efectivo).

Tabla 18
Cálculo de la cantidad de fósforo movilizable a partir de la mineralización de la materia orgánica del suelo.

P_{mo} (g/m²)	<10	10 a 59	60 a 119	120 a 179	180 a 240	240>
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Medio alta	Alta	Muy alta

Fuente: Modificado de Siebe *et al.*, 2016.

Potasio (K). El potasio es absorbido por las plantas en forma de K+. Su concentración en los tejidos vegetales oscila entre el 0.5 al 6% de su peso seco. A diferencia de otros nutrimentos no forma compuestos, por lo que su principal función está relacionada con la fuerza iónica de las soluciones. Otras funciones del potasio son: activar enzimas involucradas en procesos fisiológicos, bombear agua hacia el interior de las raíces e intervenir en la formación de ATP (Havlin *et al.*, 1999; Marschner, 2012). Después del nitrógeno, el potasio es el nutrimento que más absorben las plantas. En los suelos se encuentra en un intervalo que va de 0.5% a 2.5%. Aunque el contenido de potasio en el suelo es muchas veces mayor al que requieren las plantas, solamente una pequeña fracción es disponible para éstas (1 a 10% son lentamente disponibles y de 0.1% a 2% son rápidamente disponibles). La absorción de K+ decrece con la presencia de Ca^{2}+ y Mg^{2}+. Los síntomas que evidencian las deficiencias en potasio varían dependiendo de la especie, usualmente hay decremento en el tamaño de las plantas y clorosis con tonos verdes en la base de las hojas (Havlin *et al.*, 1999).

La porción ocupada por los cationes K, Ca, Mg y Na (también llamados bases intercambiables) de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (compuesto principalmente por los cationes mencionados, además de H y Al) se denomina saturación de bases. El contenido de bases intercambiables en cmolc/kg de un suelo depende directamente de la acidez de éste, por lo que puede ser inferido a partir de la capacidad de intercambio catiónico total, multiplicándola por un factor determinado principalmente por el pH del suelo, pero también influido por el contenido de materia orgánica y la textura. El procedimiento para hacer estos cálculos se puede consultar en el Manual de Siebe *et al.*, 2016.

Magnesio (Mg). Es absorbido por las plantas como ion bivalente Mg^{+2} y es el constituyente central de la clorofila, el pigmento verde de las hojas que funciona como un aceptador de la energía provista por el sol; por ello, del 15 al 20% del magnesio contenido en la planta se encuentra en las partes verdes.

El magnesio participa en las reacciones enzimáticas relacionadas a la transferencia de energía de la planta (FAO, 2002) y está estrechamente relacionado con la naturaleza física del suelo, es mayor la probabilidad en suelos arcillosos y mínimo en aquellos arenosos donde el magnesio está sometido a fuertes lavados. La disponibilidad de este elemento está fuertemente limitada en suelos netamente alcalinos o ácidos y en aquéllos con bajo contenido de materia orgánica (Piaggesi, 2004).

Azufre (S). Es un constituyente esencial de proteínas y también está involucrado en la formación de la clorofila. Es tan importante en el crecimiento de la planta como el fósforo y el magnesio; pero su función es a menudo subestimada (FAO, 2002).

Calcio (Ca). Es esencial para el crecimiento de las raíces y como constituyente del tejido celular de las membranas. Aunque la mayoría de los suelos contienen suficiente disponibilidad de Ca para las plantas, la deficiencia puede darse en los suelos tropicales muy pobres en este elemento (FAO, 2002). Desempeña una actividad antagónica al potasio, favoreciendo la reducción del volumen del plasma, incrementando la transpiración y reduciendo la absorción del agua (Piaggesi, 2004).

2.5.4 Análisis de la fragmentación del paisaje

Unos de los principales impactos que se generan durante la construcción de infraestructura carretera es la fragmentación del paisaje, esto a causa de la generación de parches de vegetación, los cuales son áreas de vegetación y/o ecosistemas naturales conservados o semi conservados que han quedado aislados debido a la fragmentación, por lo tanto, es necesario buscar alternativas de conectividad ecológica de estas áreas para que sigan cumpliendo sus funciones ecológicas y, de cierta forma, se recupere el impacto visual al paisaje. Para mayor detalle de los impactos relacionados a fragmentación del paisaje por infraestructura lineal se recomienda consultar el *Manual de diseño de pasos para fauna silvestre en carreteras* elaborado por la Dirección General de Servicios Técnicos (2020).

Para evaluar la fragmentación del paisaje en el sitio donde se pretende llevar a cabo un proyecto de revegetación se recomienda considerar diferentes variables, tales como:

A. Área de los parches.

El tamaño es simplemente el área total abarcada por el parche. El tamaño de los fragmentos presentes en el paisaje es un factor importante cuando se consideran las probabilidades de conservar especies representativas de un ecosistema.

B. Efectos de borde y área de hábitat interior.

Considerando que el microclima en fragmentos es diferente al de un tipo de vegetación conservado continuo, debido a la penetración de luz y vientos en el sotobosque resultante de su exposición a ambientes no forestales como pastizales o campos de cultivos. Este aumento de la penetración de luz y vientos en la porción más externa del fragmento genera lo que se suele llamar “efecto borde”, o sea, una diferencia en la composición y abundancia de especies en el borde, con mayores oportunidades para especies invasoras y con repercusiones significativas en la fauna silvestre.

C. Forma de los fragmentos.

La forma se refiere a la figura de un área bidimensional, determinada por la variación de sus márgenes o bordes. La forma de los parches es importante desde el punto de vista ecológico, debido a que afecta directamente los movimientos y flujos entre ecosistemas adyacentes.

D. Distancia a parches del ecosistema y conectividad.

El valor de conservación de un determinado fragmento de un ecosistema puede ser aumentado o degradado de acuerdo con el patrón de los otros elementos del paisaje a su alrededor.

Las medidas de vecindad más comunes son la dispersión, la intersección y la conectividad. La dispersión se refiere a la menor distancia en línea recta del borde de un parche o borde del parche similar más próximo; la intersección calcula el cambio de atributos entre parches adyacentes; y la conectividad considera el contenido individual de los parches, formas, tamaños, proximidad a condiciones similares y corredores y conexiones entre parches.

E. Diversidad de ambientes.

La interacción de factores bióticos e históricos con diferentes tipos de ambientes físicos resultan en la formación de diferentes tipos de ecosistema y comunidades naturales en el paisaje. La heterogeneidad de hábitat en el paisaje es, por lo tanto, uno de los factores que contribuyen a la diversidad. Para lograr la preservación de una porción significativa de la biota de una región, lo ideal sería mantener un sistema de fragmentos de ecosistema con alto grado de disimilitud entre parches.

2.5.5 Identificación de actividades antropogénicas que pueden afectar los sitios a revegetar

El uso de suelo es uno de los factores que se debe tomar en cuenta para determinar la viabilidad de la revegetación y la prioridad de emprender acciones en un sitio con relación a otro. Faustino y Jiménez (2000) identificaron seis vocaciones (usos del suelo) potenciales que pueden tener las áreas a revegetar: hídrica, forestal, agrícola, pecuaria, recreativa y ecológica, determinadas por los recursos más abundantes en calidad y cantidad, además de su capacidad de brindar servicios ecosistémicos y de los valores socioculturales y económicos que definirán el uso más apropiado de los sitios.

Identificar la interacción dentro de los diferentes usos y presiones antropogénicas que se ejercen sobre el suelo en las áreas a revegetar podrá influir significativamente sobre el éxito de los proyectos. Por ejemplo, algunos investigadores indican que en áreas donde el régimen hídrico ha sido alterado por acciones como la deforestación o la sobreexplotación de acuíferos es prácticamente imposible restaurar humedales similares a los que se degradaron o crear humedales ricos en especies nativas.

El manejo adecuado de los sitios a revegetar implica también definir las áreas apropiadas para la producción o para la conservación; o bien, realizar acciones productivas sin ocasionar graves efectos negativos sobre los recursos naturales. Existen diversas prácticas recomendadas con este objetivo, destacando las agronómicas, forestales, agroforestales, hidráulicas, manejo de áreas protegidas, control de torrentes y defensas de riberas, uso adecuado de agroquímicos y plaguicidas, promoción de servicios ecológicos y agroindustrias (Faustino y Jiménez, 2000).

Asimismo, conocer el uso de suelo permite identificar las presiones antropogénicas en los sitios por las actividades humanas, ya que algunas de éstas tienen un impacto significativo sobre las plantaciones y pueden determinar su éxito o su fracaso. La premisa base es que, en México, donde existen unidades de producción de pequeñas superficies, los dueños y poseedores combinan distintos usos de la tierra, mismos que pueden tener repercusiones negativas sobre las áreas donde se realicen actividades de revegetación, por ejemplo, lo que ocurre al combinar una zona de revegetación con actividades de pastoreo, donde las afectaciones por el ganado serán evidentes en las plantas establecidas, reduciendo el éxito de las actividades de revegetación.

Además del uso de suelo, algunos factores de disturbio relacionados a las actividades humanas y que deben ser tomados en cuenta al momento de elegir los sitios donde se pretende realizar una revegetación son:

- Incendios: estos incidentes son considerados como uno de los principales factores de riesgo de alta consideración para las actividades de mantenimiento de la revegetación, por lo tanto, para minimizar el riesgo es necesario implementar acciones preventivas, como es el caso de la apertura de las brechas cortafuego

y, en el caso de registrarse un incendio, se recomienda considerar la participación de personal que conozca las técnicas de combate más apropiadas de acuerdo con las herramientas y personas disponibles.

- Ganado: en muchas ocasiones, al considerar las actividades de revegetación en pastizales o zonas agrícolas, los sitios también suelen ser utilizados para actividades de ganadería (como el pastoreo), poniendo en alto riesgo el éxito de la revegetación, por lo que se tiene que considerar este factor desde la fase de planeación, y considerar que será necesaria la protección contra los animales, tanto silvestres como domésticos.
- Agricultura: la agricultura puede ser considerada como otro riesgo al momento de la implementación de las actividades de revegetación, ya que en muchas ocasiones los agricultores practican la quema de residuos de las cosechas y estos eventos pueden salirse de control.
- Vandalismo: esta es una actividad muy difícil de prever. En sitios de uso común y de espacio público la revegetación estará probablemente estresada y afectada constantemente, ya que intencional o accidentalmente las plantas pueden ser quebradas, arrancadas o lastimadas. Para contrarrestar esta amenaza se recomienda programar pláticas de concientización ambiental y colocación de carteles informativos para la población, acerca de las actividades que se realizan, de los beneficios que tendrá la revegetación y de los cuidados que debe tener el sitio para lograr la sobrevivencia adecuada.
- Adecuación y modificaciones a los predios por alguna obra: otra de las amenazas potenciales que sufren las revegetaciones es la modificación o cambio de uso del suelo donde ya se encuentra instalada la plantación, estos cambios productivos son muy difíciles de prever, por lo cual es muy importante que durante la gestión del predio se haga hincapié en la importancia de instalar la revegetación y los beneficios ambientales que se tendrán a nivel local.

Otro aspecto por considerar es la sucesión ecológica que se observa en la vegetación del sitio donde se efectuarán las actividades de revegetación, en el contexto de la sucesión ecológica esperada, es decir, las condiciones que tendrán efectos en el sitio donde se implemente el proyecto. En función de su magnitud, la recuperación de las áreas forestales degradadas podrá tener distintos efectos en el ambiente, por ejemplo, en la estabilización ante los mecanismos torrenciales, a través del incremento de la infiltración y la reducción de la velocidad del escurrimiento superficial, entre otros (Mintegui-Aguirre y Robredo-Sánchez, 1994).

Asimismo, es importante conocer la ubicación de los sitios respecto a la cuenca hidrográfica e identificar dónde se ubican los principales procesos de degradación en ésta: se pueden localizar, por ejemplo, en las laderas o en los cauces y los valles. En términos prácticos, es prioritario iniciar los procesos de revegetación en las partes altas de la cuenca, pues si éstas se encuentran desprotegidas, los procesos erosivos pueden afectar los resultados de las plantaciones establecidas en las secciones medias o bajas. En los casos donde las masas forestales de las partes altas no tienen problemas de degradación, los procesos de revegetación podrían realizarse inicialmente en la sección media.

Finalmente, la disponibilidad de caminos de acceso y recursos (agua, electricidad, etc.) son aspectos clave para la caracterización de los sitios susceptibles a revegetar,

ya que representan en muchos casos la reducción de costos en los trabajos y mayor facilidad en la ejecución de las tareas de conservación y monitoreo, etapas clave para lograr éxito en los objetivos planteados para los proyectos de revegetación.

2.6 Identificación de unidades de revegetación y selección de la paleta vegetal

Una vez seleccionados los sitios donde se pretende llevar a cabo la revegetación y caracterizados con respecto a los factores más relevantes, se prosigue a establecer las unidades de revegetación y determinar la paleta vegetal para cada una, con la combinación de especies adecuada para cada ecosistema (preferentemente nativas).

2.6.1 Definición de las unidades de revegetación

Las unidades de revegetación son superficies que se delimitan por la topografía, la vegetación remanente, el clima y el nivel de perturbación en el suelo, y se establecen después de que se ha construido la infraestructura carretera. Es posible que una misma unidad de revegetación se repita en las distintas áreas o sitios elegidos a intervenir, por ejemplo, se puede tener la misma unidad de revegetación en diferentes cortes a lo largo del trazo.

Es muy recomendable elaborar un mapa con las diferentes unidades de revegetación a lo largo de la carretera, en un sistema de información geográfica (SIG). Con esta herramienta se puede calcular la superficie que abarca cada unidad de revegetación y, junto con los datos de análisis de la vegetación tomada de estudios previos o de los muestreos de los sitios de referencia, se puede hacer una estimación de la cantidad de plantas requeridas por unidad de revegetación y para todo el proyecto.

Las unidades de revegetación son áreas similares en cuanto a tratamiento de revegetación y factores ambientales (p. ej. suelos, clima y vegetación potencial). En terrenos montañosos, puede haber varias unidades de vegetación a lo largo del derecho de vía, debido a cambios en aspectos como el tipo de suelo, la vegetación y el drenaje. Sin embargo, existen caminos que solamente tienen una unidad de revegetación, que puede abarcar una parte importante de la carretera por la uniformidad del paisaje.

El primer paso para desarrollar una unidad de revegetación es agrupar los principales tipos de suelos, junto con las características importantes similares para restablecer las comunidades de plantas nativas. Por ejemplo, en un proyecto con un grupo de suelos con menos de 30 cm de profundidad, se tendría un tratamiento de revegetación diferente que en zonas con suelos profundos. Entonces, se tendrían dos unidades base de revegetación, una de suelos someros y otra con suelos profundos, ambas carentes de vegetación. Sin embargo, en algunos sitios a revegetar se presenta vegetación remanente, en estos casos para las unidades de revegetación se recomienda completar la cantidad de individuos que falten por especie, principalmente de las especies arbóreas.

En la siguiente Tabla se presenta un ejemplo de lista de especies de plantas requeridas para un proyecto carretero, la cual incluye las unidades de revegetación en que se usarán las especies. Con la abundancia identificada en los sitios de referencia y la superficie de los sitios de revegetación, se determinará la cantidad de plantas que se utilizará en cada unidad de revegetación y en el proyecto carretero en total.

Tabla 19

Ejemplo de lista de especies de plantas requeridas para un proyecto.

Nombre científico	Sitios de referencia				Unidades de revegetación			Plantas por propagar por especie (no. de individuos)
	Nombre común	Forma de vida	Sitio de referencia	Abundancia (individuos/ha)	Superficie por unidad de revegetación (UR)	Abundancia (individuos/ ha)	Profundidad del suelo	
Agave salmiana	Maguey	Roseta herbácea	1	500	UR1=20	Sin vegetación	Somero y pedregoso	10000
Buddleja cordata	Tepozán	Árbol	1	1500				30000
Ipomoea purpurea	Campana	Enredadera	1	400				8000
Miravilis jalapa	Aretito	Hierba	1	300				6000
Pittocaulon praecox	Palo loco	Arbusto	1	600				12000
Quercus rugosa	Encino	Árbol	1	800				16000
Salvia mexicana	Tlacote	Arbusto	1	2000				40000
Sedum oxipetalum	Siempre viva	Arbusto	1	2000				40000
Buddleja cordata	Tepozán	Árbol	2	300	UR2=2	Sin vegetación	Profundo	600
Pinus montezumae	Pino	Árbol	2	800				1600
Quercus laurina	Encino	Árbol	2	400				800
Salvia fulgens	Mirto	Arbusto	2	1000				2000
Buddleja cordata	Tepozán	Árbol	2	300	UR3=1	400	Profundo	0
Pinus montezumae	Pino	Árbol	2	800		600		200
Quercus laurina	Encino	Árbol	2	400		250		150
Salvia fulgens	Mirto	Arbusto	2	1000		850		150
Prunus serotina	Capulín	Arbusto	-	-		100		0
Número total de plantas a propagar en el vivero								165,500

Donde:
UR 1= Unidad de revegetación 1.
UR 2= Unidad de revegetación 2.
UR 3= Unidad de revegetación 3.

Las unidades de revegetación también agrupan áreas que tienen los mismos objetivos de revegetación. El proyecto de una carretera puede incluir un humedal construido para mantener o mejorar la calidad del agua. En otra área, el objetivo puede ser mejorar el hábitat de polinizadores. Estas áreas serían designadas como dos unidades de revegetación distintas porque tendrían diferentes tratamientos y especies vegetales. Se incluiría una mezcla de plantas para polinizadores en la unidad del hábitat polinizador y otra mezcla de especies para la unidad de humedales. Las unidades de revegetación para humedales se pueden desarrollar para mejorar a las especies que se desarrollan en estos ambientes y mantener el funcionamiento del humedal que se ha desarrollado. Esto puede incluir el desarrollo de un suelo (Tecnosol) que sea específico para especies de humedales y filtración de agua.

Las características de la infraestructura carretera y de su procedimiento constructivo también son relevantes en la definición de las unidades de revegetación. En los terrenos montañosos, los cortes y rellenos de laderas frecuentemente son designados como unidades de vegetación separadas por las diferencias que existen entre los dos tipos de laderas en cuanto a tipo de suelo (suelo natural contra relleno), la profundidad, la inclinación de la pendiente y el drenaje.

2.7 Gestión socioambiental de predios para revegetación

Este apartado ha sido desarrollado con la finalidad de brindar recomendaciones a todos aquéllos dedicados a la planeación, diseño, construcción, conservación y operación de carreteras dentro y fuera de la SICT, sobre la gestión socioambiental de los predios que serán revegetados. Tal gestión abarca desde la etapa de mediación y el manejo de conflictos socioambientales, hasta su resolución con la compensación de los daños derivados de la construcción de infraestructura carretera, denominada compensación ambiental. Asimismo, se explicará el proceso de restauración productiva como una alternativa de compensación ambiental.

La gestión socioambiental define las medidas orientadas a trabajar de manera integral en el sistema ambiental de un proyecto carretero para lograr su adecuada inserción en su entorno. Es decir, la estrategia para que la carretera afecte en la menor medida posible al medio ambiente, mitigue y compense dichos impactos y genere beneficios para los actores involucrados, y conseguir así un desarrollo sustentable. Este concepto es conocido también como gestión del medio ambiente y se orienta a resolver, mitigar y/o prevenir los problemas de carácter socioambiental, con el propósito de lograr un proyecto carretero sin conflictos futuros, entendido éste como aquél que les permite a todos los actores involucrados el desarrollo de las potencialidades del patrimonio biofísico, cultural y social en el territorio de incidencia.

El compromiso con el cuidado del medio ambiente en proyectos de infraestructura carretera mejora la imagen de las empresas involucradas (promoventes) ante la sociedad, los usuarios y frente a actores locales, además motiva a los involucrados para mejorar la calidad de los servicios prestados y la eficacia en el desarrollo de sus actividades, lo que genera ventajas competitivas.

El ámbito de competencia o de aplicación de la gestión socioambiental para predios en infraestructuras carreteras puede ser un asunto muy amplio e incluiría diferentes campos sobre los que actuar. En este sentido, entran en juego las políticas ambientales, las directrices públicas y/o privadas de los grandes temas y los contextos sociales, tanto locales como regionales.

La gestión socioambiental implica la coordinación de actividades y solicitudes de permisos y trámites ante diversos sectores, entre los que se pueden mencionar:

A. Gestión ante el sector privado.

En la gestión de predios que correspondan a dueños o poseedores de tierras privadas entran estrictamente los particulares como posibles sujetos de derecho.

B. Gestión ante comunidades agrarias.

Aquí caben todos los terrenos que pertenecen a ejidatarios o comuneros, ya sean pueblos originarios y comunidades agrarias dentro del territorio nacional. Así, ante cualquier primera intervención debe ser de forma correcta y utilizarse procedimientos de Consulta Pública y Consentimiento, Libre, Previo e Informado (CLPI) si se trata de una comunidad indígena, ya sea ejido o comunidad agraria. Si nos encontramos en un ejido con población mestiza será a través de una primera reunión con el comisariado para poder presentar el proyecto ante la asamblea.

Tanto en la Asamblea Ejidal como en la Procuraduría Agraria se pueden solucionar conflictos relacionados con derechos agrarios de manera breve, evitando un juicio ante el Tribunal Agrario. Ésta es la principal recomendación por seguir, una vez conociendo e identificando los predios y acciones, *ex ante* del proyecto e incluso previo a cualquier gestión.

2.7.1 Compensación ambiental como medida de mitigación a las afectaciones de la infraestructura carretera

Como resultado de las autorizaciones ambientales a las que se someten los proyectos de carreteras y vías férreas, los promoventes adquieren compromisos para llevar a cabo acciones de revegetación en predios fuera de las áreas afectadas por el proyecto, como medidas de compensación ambiental, las cuales quedan acotadas a la superficie que condiciona la autoridad competente en sus diferentes resolutivos.

En ocasiones, la superficie con la que se dispone en el proyecto no resulta suficiente o adecuada para la revegetación, siendo necesaria la búsqueda de tierras adicionales a los terrenos liberados, para realizar en ellas las acciones que solicita la autoridad ambiental. Para ello se puede recurrir a zonas o predios fuera del área del proyecto que pueden ser de jurisdicción federal, propiedad privada o centros agrarios, entre otros.

Por lo anterior, se pueden clasificar en dos categorías principales los predios: a) la superficie que compete directamente al proyecto de infraestructura y que puede estar destinada en su etapa final para la compensación ambiental y b) la superficie fuera

del área del proyecto que mediante una gestión adecuada con los propietarios de las tierras puede ser utilizada para cumplir con los objetivos y las condicionantes requeridas, principalmente la revegetación.

Es importante considerar que las zonas de intervención por la infraestructura carretera o vías férreas deben estar libres de materiales residuales y ya no deben de estar destinadas para obras de la infraestructura a futuro.

En cuanto a las zonas fuera de la intervención de la infraestructura carretera o vías férreas en los terrenos federales, éstas pueden ser márgenes, camellones de las vialidades, espacios de uso común, parques, centros educativos, Áreas Naturales Protegidas y zonas recreativas. Los centros educativos son predios muy viables porque se pueden complementar con campañas enfocadas a la educación ambiental. Las propiedades privadas y agrarias pueden ser bajo cualquier esquema jurídico, siempre y cuando las propias actividades productivas no pongan en riesgo la revegetación como proceso de restauración ambiental.

Es importante señalar que las acciones de revegetación en compensación por afectación ambiental pueden desarrollarse de forma directa, por ejemplo, mediante una reforestación o restauración ecológica de terrenos dañados o poco productivos, conservando la propia promovente del proyecto dichos sitios a lo largo del tiempo; o bien revegetarlos y posteriormente, en acuerdo con el propietario, conservarlos bajo un esquema de "pago por servicios ambientales" en donde, después de realizada la revegetación o restauración ecológica del sitio, el promovente del proyecto paga al dueño del terreno por conservar y mantener en buen estado la vegetación para que se desarrolle adecuadamente y se conserve a lo largo del tiempo.

En cualquier esquema, la intención es que los terrenos reforestados, revegetados o restaurados en compensación por daños ambientales, perduren en el tiempo y repongan los bienes y servicios ambientales que fueron eliminados en el sitio del proyecto.

La ubicación estratégica de estos terrenos muchas veces puede resultar benéfica para el propio proyecto carretero, al controlar procesos de erosión que puedan azolvar obras de drenaje, o controlar mediante una cobertura vegetal, caídos y taludes inestables que pueda resultar en la protección de la propia infraestructura.

2.7.2 Restauración productiva: una alternativa de compensación socioambiental

La construcción y conservación de la infraestructura carretera comprende actividades y obras que necesariamente modifican el territorio y el paisaje, causando impactos ambientales. La ubicación geográfica, el tipo, frecuencia e intensidad de la actividad, el área de afectación, el uso de suelo y la cubierta anterior a la construcción, son los factores determinantes del impacto ambiental generado. Dicho impacto no siempre ocurre en terrenos forestales o con cobertura de vegetación natural, sino que puede ocurrir en zonas de potreros, campos agrícolas abandonados o poco productivos, zonas de agricultura de temporal, entre otros.

Para compensar tales impactos es de relevancia tomar en cuenta un nuevo enfoque, conocido como *restauración productiva*, el cual se refiere a la restauración de

algunos elementos de la estructura y función del ecosistema original, junto con un proceso sustentable de productividad de la tierra, por medio de técnicas agroforestales y agroecológicas con el objetivo de ofrecer, adicional a la cobertura forestal, productos que generen bienes económicos a la población local y propietarios de los terrenos como pueden ser huertos, zonas de apicultura, zonas de producción de café a la sombra, entre otros. Éste es un enfoque vanguardista en el conocimiento y desarrollo de estrategias y mecanismos de compensación a los daños e impactos generados por las obras de infraestructura, que buscan un beneficio tanto ambiental como social; previo acuerdo con los propietarios de las tierras.

La restauración se define como toda actividad intencional mediante la cual se inicia o se acelera el proceso de recuperación de un ecosistema en situación de degradación (Plataforma intergubernamental científico-normativa sobre diversidad biológica y servicios de los ecosistemas, s.f.). En este sentido, las iniciativas de restauración deben planificarse a nivel del paisaje, con la finalidad de restablecer la integridad ecológica y fomentar el bienestar humano (Maginnis y Jackson, 2003).

La restauración también implica que se considere al paisaje como una entidad total e integrada, considerando el conjunto de los usos de la tierra presentes, sus interconexiones e interacciones y un mosaico de intervenciones que, en conjunto, se prevé que conducirán a una restauración más eficaz y funcional que la que resultaría de un único planteamiento (p. ej. forestal) en materia de uso de la tierra.

Un paisaje puede ser considerado como el mosaico heterogéneo de los diferentes usos de la tierra (actividades agrícolas, forestales, de protección del suelo, de captación, suministro y distribución de agua, de conservación de la biodiversidad, de provisión de pastos, etc.) que se desarrollan a lo largo y ancho de una amplia extensión de terreno o en una cuenca hidrográfica.

El enfoque de paisaje busca lograr una comprensión más cabal de las interacciones que tienen lugar entre los diversos usos de la tierra y las partes interesadas, dándoles la debida consideración e integrando tales usos y partes en un proceso de gestión combinada (Foro Mundial de Paisajes, 2014). Este enfoque se entiende cada vez más como un elemento esencial para la aplicación de estrategias sostenibles en el ámbito rural del uso de la tierra y de los medios de subsistencia.

Para alcanzar resultados exitosos a largo plazo, las iniciativas de restauración enmarcadas en un esquema productivo, considerando ecosistemas y paisajes, deberán atraer a todo un espectro de partes interesadas: desde autoridades normativas a comunidades locales y desde gobiernos hasta agentes del sector privado, ya que los recursos naturales se gestionan mejor cuando se consideran desde una perspectiva más amplia, que engloba todas las percepciones, necesidades e intereses en una región.

La restauración de bosques y paisajes es un concepto nuevo que supone la aplicación de procedimientos participativos relacionados con la toma de decisiones. Así encontramos que, según la definición más coherente hoy disponible, formulada por la Asociación Global sobre Restauración Ecológica, la restauración de bosques y paisajes es "*un proceso activo que reúne a las personas para identificar, negociar e implementar prácticas que restauren el balance óptimo acordado entre los bene-*

ficios ecológicos, sociales y económicos". Este tipo de restauración implica que deben tenerse claros los objetivos de su implementación y las actividades se pueden desarrollar a gran escala o en mosaico. La restauración a gran escala tiene como fin restaurar o crear un paisaje que la mayoría de las personas llamarían bosque, mientras que la restauración en mosaico pretende restaurar o crear paisajes con varios tipos de uso de la tierra, entre los que también se incluyen bosques y otros tipos de vegetación forestal, lo que incrementa la productividad de los terrenos. A continuación, se presenta una imagen en donde se ejemplifican los dos tipos de restauración antes descritos.

Figura 22
Restauración a gran escala y en mosaico generando gran variedad de agroecosistemas.



Fuente: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y World Resources Institute (WRI), 2014.

En este tenor, la restauración productiva como medida de compensación en proyectos de carreteras que afectan paisajes mixtos representa un enfoque vanguardista y bastante adecuado en un México con alta diversidad de ecosistemas naturales y gran cantidad de usos del terreno.

En la siguiente Figura se presentan las diferentes áreas temáticas que participan en una restauración productiva.

Figura 23
Áreas clave de intervención temática en la restauración productiva.



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

La gestión social de predios en el contexto de proyectos de infraestructura carretera necesariamente debe brindar descripciones analíticas sobre actores que estarán expuestos a impactos y riesgos socioambientales, así como sobre otros con intereses diversos en el proyecto. El análisis social comprende la investigación de la relación funcional con el sitio del proyecto, con las actividades vinculadas de los grupos humanos que podrían resultar afectados, sus actividades socioeconómicas y sus estrategias de sobrevivencia.

Una vez identificados los grupos es necesario analizar sus estructuras formales e informales de organización y liderazgo que integran y movilizan a cada comunidad, los grupos y organizaciones sociales que manejan actividades socioeconómicas y la información complementaria para diseñar estrategias de desarrollo de las comunidades en la zona de influencia del proyecto. Esta información permite optimizar el diseño y operación del proyecto para evitar, minimizar, o mitigar los impactos sociales negativos, así como propiciar los beneficios del desarrollo y asegurar el acceso equitativo a los mismos por parte de los grupos afectados. Es recomendable que esta información se recopile y analice desde las etapas iniciales de un proyecto de restauración productiva.

2.7.3 Bondades de la compensación socioambiental mediante la restauración productiva

La compensación ambiental por el cambio de uso del suelo generado por la obra de una carretera se refiere a una serie de actividades de recuperación de la cobertura vegetal de los sitios fuera de la obra, a manera de intercambio por las afectaciones en sitios dentro de la obra con carácter de irreversible; incluye obras tales como el control de la erosión laminar, la implementación de obras de captación de agua de lluvia, la reforestación, entre otras. Estas acciones tienen como objetivo propiciar el desarrollo de zonas revegetadas y así compensar la vegetación dañada por la infraestructura.

Esta compensación ambiental brinda además los siguientes beneficios si se realiza bajo un esquema de restauración productiva:

- La restauración productiva dentro y alrededor de áreas de alta biodiversidad contribuye a numerosas metas y objetivos sociales y ambientales, asociados con la conservación de la biodiversidad natural en sinergia con el bienestar humano, por lo que se facilita la integración del proyecto en un entorno socioambiental.
- Los motivos para implementar proyectos de restauración productiva varían y podrían incluir, por ejemplo, la recuperación de especies individuales, el fortalecimiento de la función o la conectividad de los ecosistemas a escala del paisaje terrestre o ripario, la mejora de las oportunidades de experiencia para los visitantes, así como el restablecimiento o la recuperación de varios servicios ecosistémicos.
- La restauración productiva puede contribuir a la adaptación al cambio climático de los proyectos de infraestructura carretera o de vías férreas mediante el fortalecimiento de la resiliencia a los efectos del cambio (p. ej. control de erosión y azolve en obras de drenaje) y la provisión de servicios ecosistémicos que beneficien a las poblaciones locales, como puede ser mediante la captura de carbono y conservación del agua.
- Mejor y oportuna interacción entre actores locales y promoventes del proyecto, proponiendo alternativas ambientales y/o productivas de las que se beneficien ambos grupos.

Los proyectos o planes de compensación ambiental ofrecen la mejor alternativa de restauración del terreno, por lo que deben ser económicamente viables y técnicamente factibles. Deben incluir las acciones indispensables para lograr la compensación natural y/o productiva del paisaje, y presentar un plan con acciones claras y verificables de restauración.

Las medidas de compensación ambiental tienen por finalidad producir o generar un efecto positivo alternativo y equivalente a un efecto adverso ocasionado por la implementación del proyecto. Dichas medidas se expresan en un Plan de Compensación Ambiental, el que se deberá incluir el reemplazo o sustitución de los recursos naturales o elementos del medio ambiente afectados, por otros de similares características, clase, naturaleza y calidad; recuperando servicios ecosistémicos y beneficios sociales con estas propuestas.

Para desarrollar un Plan de Compensación Ambiental dentro de un programa de restauración productiva en carreteras de México, e incluso otro tipo de compensación mediante revegetación, será necesario considerar las zonas, actividades y recursos clave. Es decir, identificar las zonas potenciales para ejecutar la restauración por compensación; desarrollar un procedimiento estratégico para integrar terrenos en un esquema de escala local-regional; conservar elementos como los corredores para fauna; hacer un manejo integrado de acciones de restauración productiva o de restauración de terrenos; identificar áreas con potencial como proveedores de servicios ecosistémicos, etc. Con dichas acciones se dará cumplimiento a las propuestas de prevención, mitigación y/o compensación de impactos ambientales señaladas en los estudios y autorizaciones correspondientes a la infraestructura carretera.

2.7.4 Identificación de actores involucrados

Previo a la restauración productiva como medio de compensación ambiental, se recomienda realizar un mapeo e identificar la posible interrelación de actores a nivel local (comunitario e intermunicipal), y cuando corresponda, regional, según la escala o alcances de la revegetación (parcelas ejidales, áreas forestales, ecosistemas o paisajes a nivel regional). Entre los actores se pueden considerar los pobladores, las autoridades y/o representantes de organizaciones, e incluso las instituciones públicas y/o privadas con interés y/o competencias para el desarrollo de actividades de restauración productiva. La interacción y complementariedad entre los roles de los diferentes actores facilitará las acciones de planificación, implementación y monitoreo de la iniciativa de restauración productiva.

Existen tres grupos principales de actores involucrados en este proceso:

- **Actores directos**. Involucra a los dueños de los predios donde se realizará la iniciativa de restauración productiva en compensación, quienes dependen económicamente o están directamente involucrados en la utilidad futura de las áreas a restaurar. En esta categoría se pueden incluir agricultores, ganaderos, comunidades indígenas y comunidades campesinas, empresas privadas, concesionarios, titulares de derechos de aprovechamiento forestal y de fauna silvestre, titulares de proyectos de inversión pública o privada que impliquen actividades, construcciones u obras que puedan causar impactos ambientales negativos u otros que cuentan con titularidad o posesión comprobada de las áreas donde se desarrollará la iniciativa. Dependiendo del tamaño de la iniciativa puede existir una diversidad de actores que será necesario distinguir por tipo de actividad, nivel socioeconómico y tamaño de sus tierras, entre otros.
- **Actores indirectos**. Incluye a las instituciones o agencias de gobierno local, municipal y estatal cuyas funciones se encuentran relacionadas con el manejo de los recursos naturales, las áreas naturales protegidas, las actividades extractivas u otros temas relevantes para canalizar una restauración productiva por compensación, las cuales tendrán una fuerte influencia sobre los ecosistemas y el manejo de la tierra en el área de influencia de la iniciativa.
- **Grupos de interés**. Son aquellos individuos, empresas u organizaciones que financian, orientan técnicamente o tienen un interés significativo en el diseño, la implementación y los resultados de alguna iniciativa de restauración producti-

va. Estos grupos pueden incluir empresas privadas, juntas o módulos de agua, organismos de cooperación, entidades académicas y organizaciones civiles nacionales e internacionales, entre otros.

2.7.5 Desarrollo de un Plan de Compensación Ambiental

En complemento de lo anterior, se señalan las siguientes fases que se recomiendan para la elaboración de un Plan de Compensación Ambiental, ya sea mediante restauración productiva u otro tipo de acciones de revegetación.

A. Identificación de zonas para revegetación por compensación ambiental

A fin de poder desarrollar el programa de revegetación como compensación ambiental es necesario identificar zonas potenciales de ejecución, para ello, se propone como el primer paso el desarrollo de un procedimiento estratégico que permita integrar terrenos en un esquema de escala regional para lograr un manejo integrado de acciones de revegetación, restauración productiva, o de restauración de terrenos y áreas de potencial productivo, como proveedores de servicios ambientales.

Para ello, es necesario realizar los siguientes pasos:

- Identificación cartográfica de sitios.
- Análisis integrado de las áreas potenciales anteriores para tener una caracterización morfogenética y pedogenética, a nivel de las superficies y las pendientes de dichos terrenos para clasificarlos en función de sus posibilidades de ser sometidos a una revegetación exitosa.
- Elaborar un Plan de Compensación Ambiental por restauración productiva u otro tipo de revegetación, según aplique, a partir de los anteriores resultados. Se integrará un mapa general de terrenos susceptibles a ser revegetados como parte de la estrategia para el cumplimiento de condicionantes, asociado a una base de datos técnica de información general de los terrenos en lo referente a condiciones de idoneidad para realizar la revegetación.

B. Inventario de terrenos

En un sistema de información geográfica (SIG) y por métodos estadísticos multivariados se realiza la agrupación de los terrenos en función de sus atributos para diseñar un esquema de visitas prospectivas de campo para la corroboración de la información y obtención de datos en cada predio-parcela, acciones que preferentemente se realizarán en compañía de los dueños de los terrenos y/o las autoridades ejidales o comunales.

Se recomienda realizar varios recorridos de campo con los propietarios de los terrenos que se vislumbran como más apropiados para realizar la restauración productiva, en coordinación con autoridades ejidales o locales; ello se recomienda para legitimar cualquier decisión final y permite corroborar condiciones de aptitud y factibilidad técnica y jurídica para la revegetación de cada sitio.

Con dicha información se integra una base de datos jerarquizada de terrenos y propietarios, con quienes, en su momento, y a quién le competa, se deberá tener el acer-

camiento correspondiente para gestionar el uso de estos predios con fines de reforestación productiva u otras acciones de compensación ambiental que se tengan consideradas.

Se deberán aplicar entrevistas formales, dirigidas a propietarios y otros actores locales claves como líderes campesinos, autoridades agrarias y municipales, técnicos e informantes, que expliquen y difundan la intención del Plan de Compensación Ambiental. Esto disminuye la tensión social, evita generación de expectativas y socializa los acuerdos con dueños y autoridades locales. Además, resalta la importancia de los terrenos en el esquema de conservación de valor especial y permite verificar si existe el interés de comprometer sus tierras, vía algún mecanismo social-económico que se defina o haya definido como un convenio.

La información que se genera en el trabajo de campo permite identificar las condiciones actuales de perturbación de las superficies propuestas para revegetación, y hacer una caracterización de grados de perturbación del suelo (levantamiento de un perfil de suelo) y de la vegetación; con lo que también se habrá logrado realizar una adecuada selección de las especies idóneas (paleta vegetal) para cada terreno y condición ambiental, con el fin de diseñar una estrategia de compensación mediante revegetación, ya sea por acciones de restauración productiva, reforestación, recuperación, rehabilitación o restauración vegetal, siguiendo el esquema de sucesión ecológica natural de las comunidades vegetales que se desarrollan en los sitios propuestos o sus colindancias.

El uso de vegetación nativa en cada sitio destinado a la compensación ambiental por afectaciones ambientales derivadas de la infraestructura aumenta la probabilidad de éxito de las plantaciones y reduce las necesidades de mantenimiento de la vegetación, por lo que debe ser la premisa principal en la elección de la paleta vegetal en este tipo de proyectos.

Capítulo 3
Ejecución de la revegetación en sitios afectados por la infraestructura carretera

Una vez que se ha completado exitosamente la etapa de planeación de la revegetación se puede realizar la ejecución de la siembra y/o plantación, según sea el caso (la diferencia entre éstas se definirá más adelante en este apartado).

De manera general, las actividades que se desarrollarán en esta etapa son las siguientes: preparación del sitio, limpieza del terreno, manejo de material vegetal, delimitación, transporte de la planta a los sitios a revegetar, trazado, marqueo de plantación, apertura de cepas, uso de mejoradores o fertilizantes, técnicas de plantación y/o siembra, construcción de cajetes, colocación de tutores, riego de asentamiento, manejo de plagas o enfermedades, prácticas para la protección contra incendios y cercado de sitios para la protección contra animales, según sea el caso.

A continuación, se describe cada uno de los procedimientos para realizar la ejecución de los proyectos de revegetación.

3.1 Especificaciones técnicas de la revegetación para los diferentes sitios afectados por la infraestructura carretera

Las acciones que sean propuestas para llevar a cabo la revegetación de los sitios afectados por la infraestructura carretera tienen que garantizar un enfoque de sucesión ecológica, la cual puede entenderse como un proceso evolutivo natural, resultado de la modificación del ambiente físico por causas internas o externas al ecosistema y el cual, por su propia dinámica, sustituye a los organismos que lo integran. El proceso culmina con el establecimiento de un ecosistema biológicamente estable (Walker, 2005).

Para lograr los objetivos que persigue la sucesión ecológica, los trabajos de revegetación que se propongan deberán ser realizados con especies nativas y evitar a medida de lo posible el uso de especies introducidas, ya que el uso de especies introducidas puede desencadenar problemas ecológicos, como la pérdida de biodiversidad, el incremento de enfermedades, la disminución de alimentos y nutrientes para las especies nativas. Las especies introducidas pueden comportase como invasoras y evitar el establecimiento de especies nativas, lo que mermaría los resultados de todos los esfuerzos que se realicen en materia de revegetación. Por lo tanto, a continuación se

presentan algunos ejemplos de especies que se consideran pioneras en la sucesión ecológica y que se recomienda establecer en los proyectos de revegetación para algunos ecosistemas representativos.

Tabla 20
Ejemplo de especies nativas que se considerarían en las actividades de revegetación con enfoque de sucesión ecológica.

Ecosistema	Especie
Bosques templados	*Buddleja cordata* *Prunus serótina* *Alnus acuminata* *Cynodon dactylon* *Eragrostis intermedia* *Heteropogon spp.* *Cenchrus echinatus*
Selvas	*Acacia cornígera* *Bursera simaruba* *Guazuma ulmifolia* *Bouteloua spp.* *Andropogon* *Hilaria mutica* *Lycurus spp.* *Digitaria californica*
Zonas áridas y semiáridas	*Acacia farnesiana* *Celtis pallida* *Prosopis sp.* *Buchloe dactyloides* *Leptochloa spp.* *Muhlenbergia porteri* *Chloris crinita*

En la Tabla que se presenta a continuación se realizan algunas recomendaciones de las características que debe cumplir la vegetación en los proyectos de revegetación, tomando en cuenta las áreas a intervenir.

Tabla 21

Características generales de la vegetación recomendada para cada tipo de área a ser intervenida con un proyecto de revegetación.

Sitio en que aplica		Herbáceas	Arbustos	Árboles	Función específica que se busca en la vegetación
Derecho de vía	Taludes	X	X	X	Estabilizar la ladera mediante raíces pivotantes e individuos de bajo porte, que favorezcan la formación de estructura del suelo.
	Zonas de revegetación	X	X	X	Aumentar la infiltración, prevenir los procesos erosivos y mantener la biodiversidad de la región.
	Zona de cruce de cauces fluviales			X	Mantener el flujo natural de los escurrimientos, aumentar la cobertura de la vegetación en los márgenes de los escurrimientos naturales y minimizar los procesos erosivos.
Sitios fuera del derecho de vía ocupados temporalmente por las obras de infraestructura carretera	Caminos de acceso temporales	X	X	X	Revertir la pérdida de cobertura vegetal, disminuir los procesos erosivos, evitar la propagación de especies exóticas invasivas y favorecer la infiltración.
	Bancos de préstamo de materiales y plantas de trituración	X	X		Recuperar la cubierta vegetal con especies tolerantes a la perturbación, recuperar el dosel bajo con especies herbáceas y arbustos que no requieran suelos profundos para su desarrollo, favorecer la recuperación del suelo y aumentar la infiltración.
	Plantas de asfalto	X	X		Recuperar de la cubierta vegetal con especies tolerantes a la perturbación, recuperar el dosel bajo con especies herbáceas y arbustos que no requieran suelos profundos para su desarrollo, favorecer la recuperación del suelo y aumentar la infiltración.
	Bancos de tiro		X	X	Recuperar la cubierta vegetal de estas áreas mediante el establecimiento de especies arbustivas y arbóreas acordes a la zona, mejoramiento del suelo, aprovechamiento de los nutrientes de suelo y aumentan la capacidad de infiltración.
	Campamentos y patios de maquinaria		X	X	Recuperar la cubierta vegetal de estas áreas mediante el establecimiento de especies arbustivas y arbóreas acordes a la zona, mejoramiento del suelo, aprovechamiento de los nutrientes de suelo y aumentan la capacidad de infiltración.
Sitios propuestos para revegetar como medida de compensación ambiental			X	X	Conservar la biodiversidad de los ecosistemas afectados por las acciones antropogénicas, recuperar la cubierta vegetal, dar conectividad a los ecosistemas que han sido fragmentados, favorecer el refugio para la fauna silvestre, disminuir los procesos de erosión y aumentar la infiltración en la zona.
Sitios abandonados por rectificación de trazo		X	X		Recuperar la cubierta vegetal mediante el establecimiento de herbáceas y arbustos con raíces pivotantes con la capacidad de descompactar el suelo, aumentar la infiltración de esas áreas y hacer que el suelo recupere sus funciones.

En los siguientes apartados se presenta en forma de fichas técnicas para cada tipo de sitio afectado por la infraestructura carretera, las especificaciones sobre las actividades de revegetación que se proponen para recuperar la cubierta vegetal y las funciones de los ecosistemas.

3.1.1 Derecho de vía

3.1.1.1 Áreas de cortes y terraplenes

En la Tabla que se presenta a continuación, se describen las técnicas de revegetación para este tipo de áreas.

Tabla 22
Técnicas de revegetación recomendadas para áreas de cortes y terraplenes (taludes).

Áreas de cortes y terraplenes (taludes)	
Definición	Inclinación de la superficie de los cortes o de los terraplenes.
Características a valorar antes de proponer la revegetación	Los taludes tendrán que ser valorados por diferentes características tales como: **Altura del talud:** si el corte es alto y largo, tendrá una mayor masa de suelo o rocas con riego de deslizamiento. Cuanto mayor sea dicha masa, mayor será el riesgo de que se produzcan desprendimientos. A mayor cantidad de suelo y rocas, mayor riesgo de desprendimiento y mayores consecuencias. Los materiales caídos de cortes más altos tienen una mayor energía potencial que los materiales con cortes pequeños. **Ángulo de inclinación:** esta característica del talud ayudará a conocer el grado de inclinación, por lo que se tendrá que poner mucha atención en el suelo o roca que lo conforman. El análisis del suelo ayudará a identificar qué tipo de deslizamiento o falla se puede presentar. **Irregularidades:** las irregularidades de un corte tienen que ser valoradas para saber si la causa fue por fallas en el método de excavación o por un deterioro como la erosión. **Tipo de sección transversal en el corte:** es de mucha importancia tomar en cuenta el tipo de sección transversal que se presenta en la carretera, puesto que en muchas ocasiones la forma del corte tendrá gran influencia en su estabilidad.
Técnica de revegetación	Con base en las características que presente cada talud tendrá que ser la técnica de revegetación que se proponga, teniendo como opciones las siguientes: Revegetación con especies herbáceas. Revegetación con especies arbustivas. Reforestación con especies arbóreas.
Beneficios	Reducir los procesos de erosión. A medida que la erosión aumenta, crecen las dificultades para la revegetación y la conservación del talud. Minimizar el arrastre de sedimentos que provoca el escurrimiento de agua de lluvia. Prevenir deslizamientos o fallas. Evitar la aparición de caídos hacia la corona.

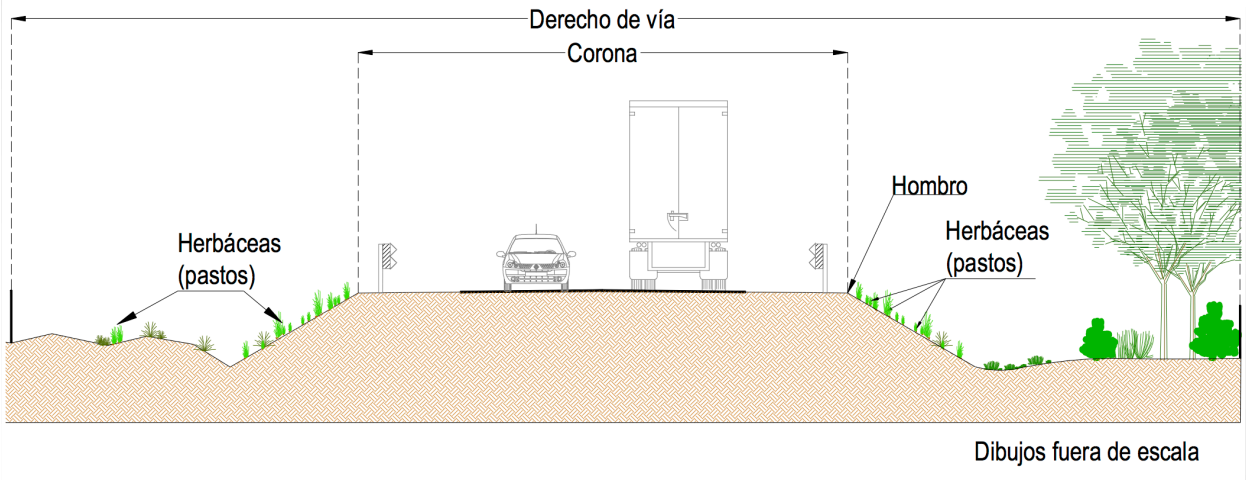
Revegetación con especies herbáceas

La revegetación de herbáceas está dirigida para ejecutarse en aquellas zonas donde se distribuyen pastizales naturales y que albergan especies de importancia ecológica y cultural. Las especies más comunes en estos ecosistemas de acuerdo con la Comisión Nacional para Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2021) son: Pasto navajita *(Bouteloua spp.)*, Zacate búfalo *(Buchloe dactyloides)*, Popotillo plateado *(Andropogon)*, Zacate llanero *(Eragrostis intermedia)*, Zacate colorado *(Heteropogon spp.)*, Toboso común *(Hilaria mutica)*, Tapete panizo *(Leptochloa spp.)*, Zacate lobero *(Lycurus spp.)* y Zacate araña *(Muhlenbergia porteri)*. Otras especies son el Cardo, huizapol o rosetilla *(Cenchrus echinatus)*, Papalote *(Chloris crinita)*, Pasto alambre o Pasto enredadera *(Cynodon dactylon)*, Zacate mano *(Digitaria californica)*, Zacate salado, Pasto salado playero *(Distichlis spicata)* y Zacate borreguero *(Dasyochloa pulchella)*.

Las actividades de revegetación de herbáceas están precedidas de las acciones de rescate de germoplasma que depende de la especie y de la época puede ser a través de semilla o de esquejes, estolones o tepes que permitan la colonización gradual de sitios degradados y que están expuestos a procesos erosivos.

Se recomienda que la revegetación con especies herbáceas se desarrolle en la primera tercera parte del talud a partir del hombro de la carretera, para el caso de taludes en terraplén la revegetación tendrá que desarrollarse con especies que no superen los 40 cm de altura. En la Figura que se presenta a continuación, se puede observar en que áreas se recomienda la revegetación con herbáceas.

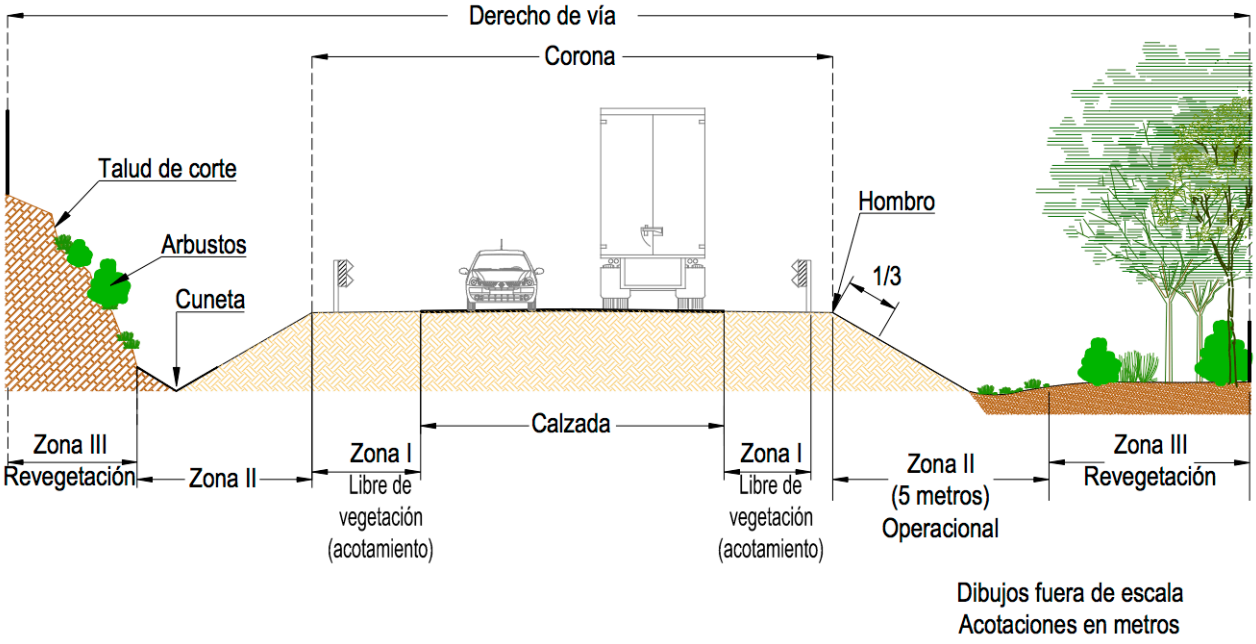
Figura 24
Revegetación de taludes con especies herbáceas.



Revegetación con especies arbustivas

La revegetación con especies arbustivas se recomienda a partir del segundo tercio del talud, considerando la forma de sección, altura y la inclinación del mismo. Por lo tanto, el ejecutor de la revegetación tendrá que valorar la viabilidad y seguridad de los usuarios de la carretera antes del establecimiento de especies arbustivas. Para este caso se tienen que establecer especies de corta altura y con raíces pivotantes que se adapten a las condiciones ambientales del sitio, además de que las especies tendrán que ser nativas de la zona y acordes al tipo de ecosistema afectado.

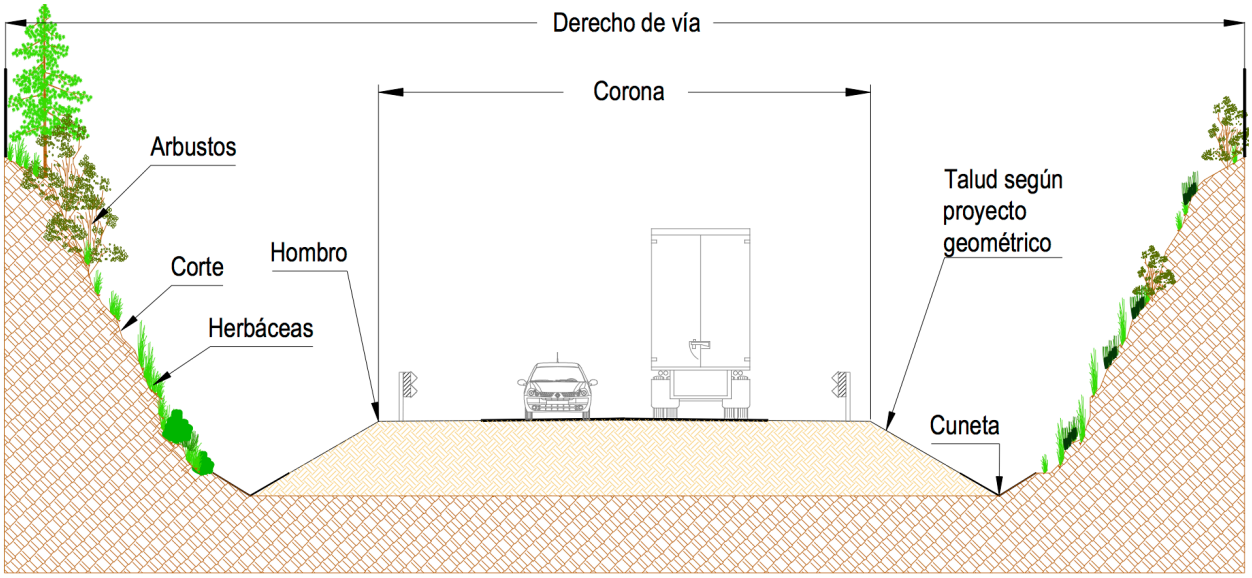
Figura 25
Revegetación de taludes con especies herbáceas y arbustivas.



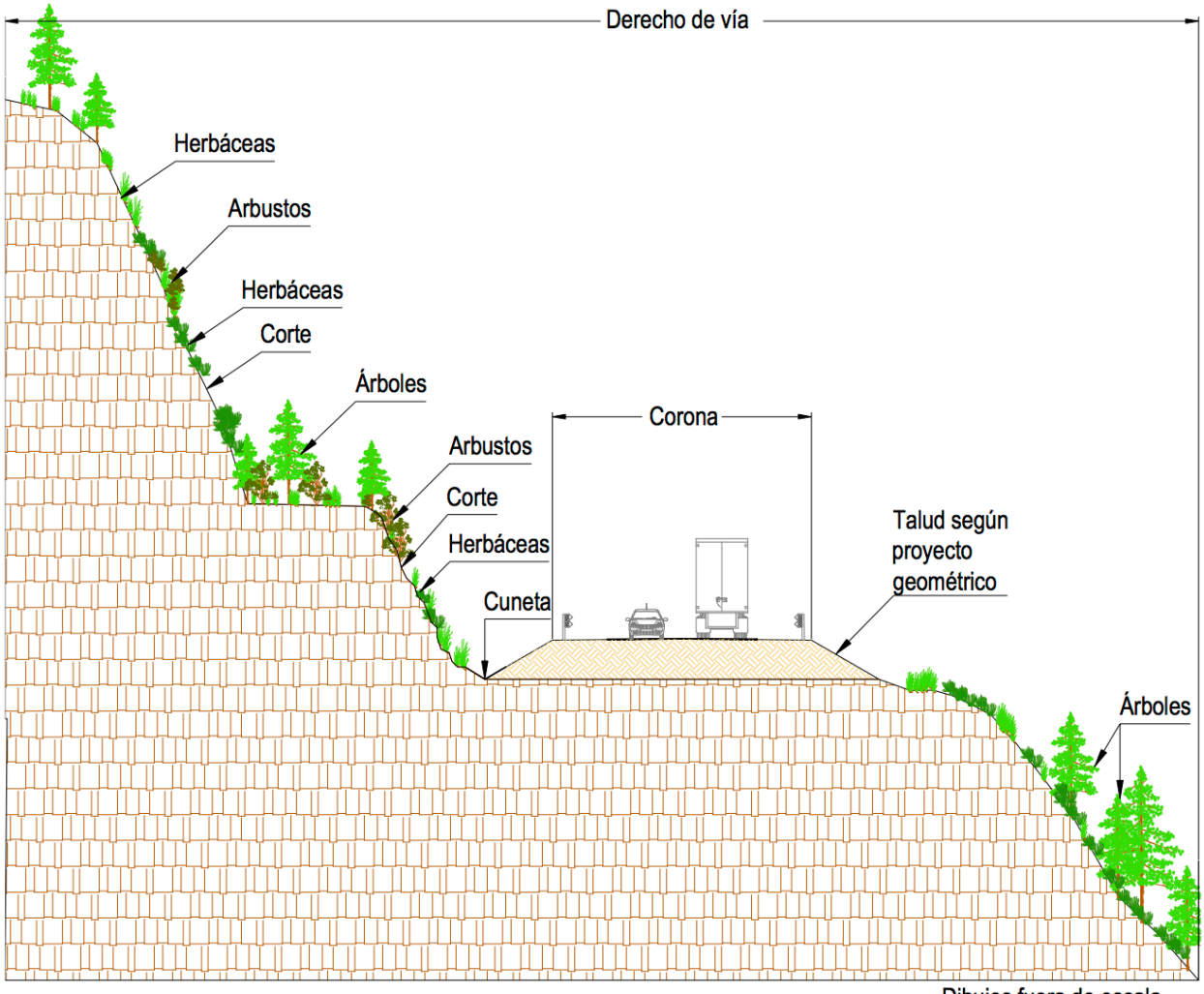
Reforestación con especies arbóreas

El establecimiento de especies arbóreas en los taludes es recomendable para aquéllos que presenten alturas prolongadas y que dentro de su estabilización consideren bermas, las especies arbóreas tendrán que establecerse en el último tercio del talud (parte alta) para que ayuden a la retención del suelo de la parte alta del talud, con el amortiguamiento de las gotas de lluvia en su copa que será más amplia ayuden a reducir la formación de escurrimientos y se eviten deslizamientos, tal como se aprecia en la siguientes imágenes. Es importante que para la propuesta de estas especies se consideren los cálculos del peso que pueden llegar a presentar en un futuro estas especies para reducir la probabilidad de deslizamientos por exceso de carga.

Figura 26
Revegetación de taludes con especies herbáceas y arbustivas, y reforestación con especies arbóreas.



Dibujos fuera de escala



Dibujos fuera de escala

En las siguientes Figuras se muestran algunas actividades que se han desarrollado en proyectos carreteros para la estabilización de taludes.

Figura 27
Ejemplo de un corte revegetado con pasto tipo alfombra. Autopista México-Tuxpan, tramo Tejocotal-Nuevo Necaxa.



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

Figura 28
Ejemplo de estabilización de un corte revegetado con tulias. Autopista México-Tuxpan, tramo Tejocotal-Nuevo Necaxa.



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

3.1.1.2 Área libre de infraestructura permanente dentro del derecho de vía

En la Tabla siguiente se describen las técnicas de revegetación para este tipo de área.

Tabla 23
Técnicas de revegetación recomendadas para el área libre de infraestructura permanente dentro del derecho de vía.

Área libre de infraestructura permanente dentro del derecho de vía	
Definición	Es considerada el área de terreno que queda exenta de todo tipo de infraestructura permanente, su ancho depende del derecho de vía considerado para el proyecto carretero. Para la construcción de las obras es necesario el desmonte total del derecho de vía, sin embargo, el área libre de obras queda desprovista de vegetación y por consiguiente expuesta a los procesos erosivos por la lluvia o el viento.
Características por valorar antes de proponer la revegetación	**Ancho del derecho de vía:** considerando que el derecho de vía es diferente para cada tipo de carretera es importante valorar qué ancho quedará disponible para proponer alguna técnica de revegetación. **Topografía:** es un factor importante para conocer las diferentes formas del terreno. **Tipo de suelo:** es importante conocer la profundidad, textura, capacidad de retención de humedad y capa orgánica del suelo.
Técnica de revegetación	Con base en las características que presente la franja de terreno que se pretenda revegetar tendrá que ser la técnica de revegetación que se proponga, teniendo como opciones las siguientes: • Revegetación con especies herbáceas. • Revegetación con especies arbustivas. • Reforestación con especies arbóreas.
Beneficios	• Reducir los procesos de erosión de suelos. • Aumentar la infiltración del agua de lluvia. • Minimizar la formación de escurrimiento. • Recuperar la cubierta vegetal que se perdió por las actividades de desmonte. • Mantener la diversidad de especies vegetales.

Revegetación con especies herbáceas

Se recomienda la revegetación con especies herbáceas nativas de la zona menores a 50 cm, para que los 5 m próximos a la calzada no tengan obstáculos que impidan la visibilidad.

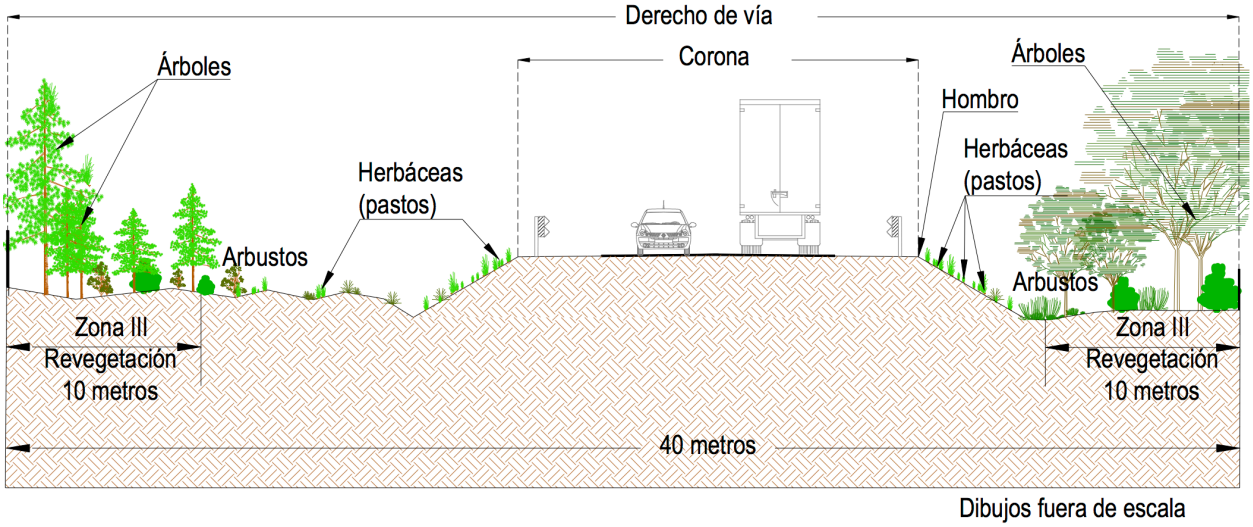
Revegetación con especies arbustivas

El establecimiento de especies arbustivas dentro del derecho de vía para recuperar la cubierta vegetal que se vio afectada por las acciones del desmonte, es recomendable que sea desarrollada en las zonas II y III, de acuerdo con la zonificación del derecho de vía propuesto en este Manual.

Reforestación con especies arbóreas

El establecimiento de especies arbóreas dentro del derecho de vía de una carretera es recomendable para aquellas que tengan un derecho de vía mínimo de 40 m, ya que para la plantación de estos ejemplares se estaría considerando una franja de 10 m de ancho. A continuación se presenta una imagen con el área que se propone utilizar para el establecimiento de especies arbóreas.

Figura 29
Revegetación con especies herbáceas y arbustivas, y reforestación con especies arbóreas dentro del derecho de vía.



3.1.1.3 Área de cauces fluviales

A continuación se presenta una Tabla con las técnicas recomendadas para la revegetación de este tipo de áreas.

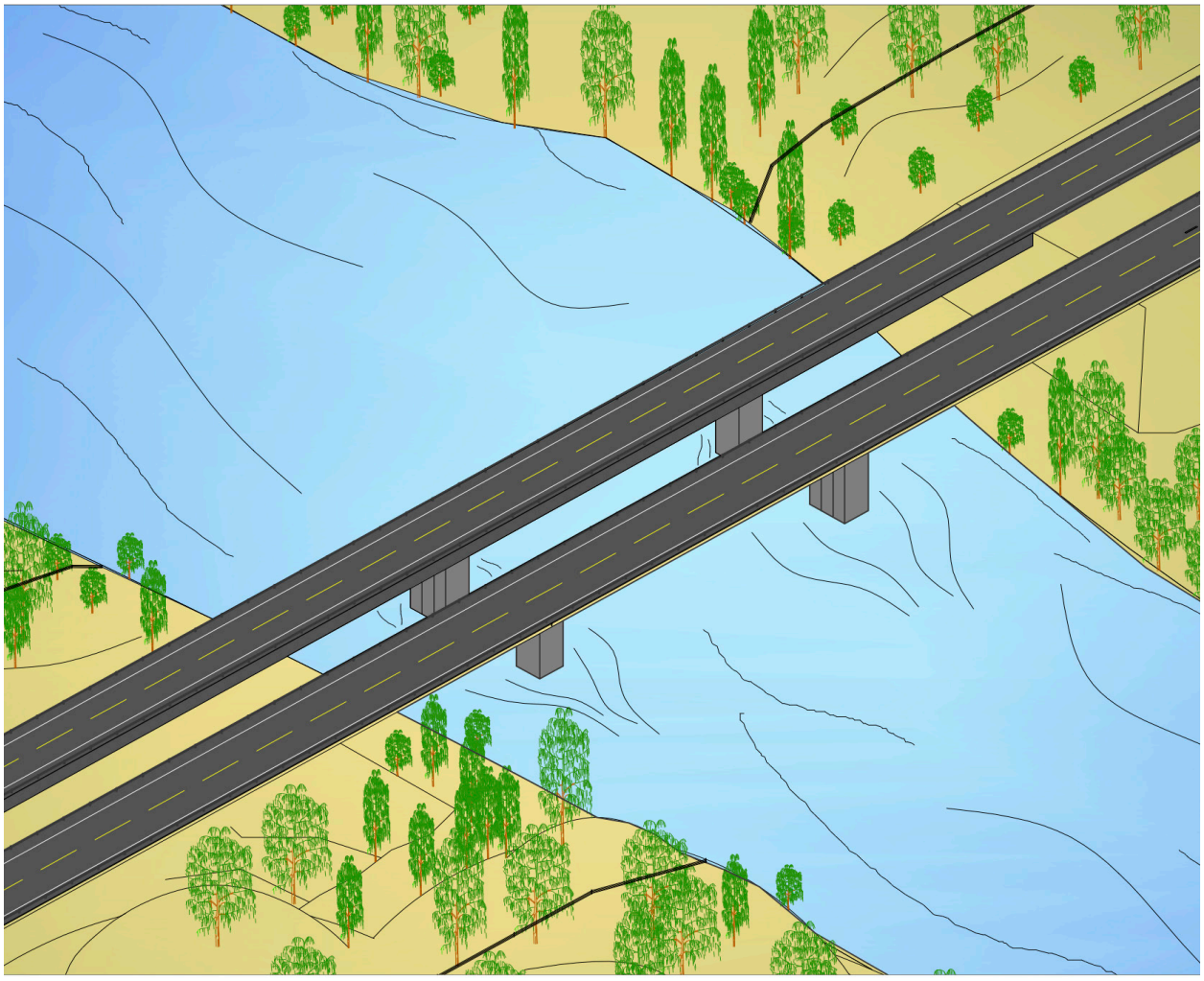
Tabla 24
Técnicas recomendadas para áreas de cauces fluviales.

Área de cauces fluviales	
Definición	Se considera a la franja de terreno que se encuentra contigua a la línea que define el Nivel de Aguas Máximas Ordinarias de un escurrimiento.
Características por valorar antes de proponer la revegetación	**Tipo de suelo:** es importante conocer la profundidad, textura, capacidad de retención de humedad y capa orgánica del suelo. **Tipo de vegetación:** considerando el reconocimiento de las especies vegetales que se desarrollan en la zona aledaña se propondrán especies que se adapten a la zona a revegetar.
Técnica de revegetación	Con base en las características que presente el escurrimiento tendrá que ser la técnica de revegetación que se proponga, teniendo como opción la siguiente técnica: • Reforestación con especies arbóreas.
Beneficios	• Recuperación de la cubierta vegetal y la flora característica de la zona donde se ubique el escurrimiento. • Minimización de los procesos erosivos. • Aumento de la infiltración y recuperar la calidad del agua. • Mantener el flujo natural de los cauces.

Reforestación con especies arbóreas

Las zonas para revegetar por medio de la técnica de reforestación tendrán que ser acordes a cada tipo de escurrimiento, ya que en ocasiones se localizarán de tipo perenne o intermitente; en los primeros se tiene que recuperar la vegetación de galería y en los de tipo intermitente por lo regular la vegetación es similar a la de un ecosistema forestal. La propuesta de especies tiene que ser acorde a la zona a rehabilitar, es recomendable utilizar especies que en su edad adulta alcancen un porte arbóreo para que reduzcan con mayor efectividad los procesos de erosión y eviten el aumento en la formación de escurrimientos de gran volumen. A continuación se presenta una Figura con la estructura arbórea que se esperaría tener con la revegetación en un largo plazo.

Figura 30
Reforestación con especies arbóreas en zona federal de cauces.



3.1.2 Sitios fuera del derecho de vía ocupados temporalmente por las obras de infraestructura carretera

3.1.2.1 Caminos de acceso temporales

Las recomendaciones para definir las técnicas de revegetación en caminos de acceso temporales se presentan en la siguiente Tabla.

Tabla 25
Técnicas recomendadas para caminos de acceso temporales.

Caminos de acceso temporales	
Definición	Accesos habilitados cuando los predios del derecho de vía se encuentran incomunicados, donde no existen caminos que permitan un acceso regulado.
Características por valorar antes de proponer la revegetación	**Topografía:** es un factor importante para conocer las diferentes formas del terreno. **Tipo de suelo:** es importante conocer la profundidad, textura, capacidad de retención de humedad y capa orgánica del suelo. **Grado de compactación del suelo:** es importante la valoración de este factor ya que, con base en los resultados obtenidos, se podrán proponer actividades de descompactación o mejoramiento del suelo previos a la revegetación. **Tipo de vegetación:** considerando el reconocimiento de las especies vegetales que se desarrollan en la zona aledaña se propondrán especies que se adapten al sitio a revegetar.
Técnica de revegetación	Con base en las características que presente el camino de acceso que se pretenda revegetar tendrá que ser la técnica de revegetación que se proponga, teniendo como opciones las siguientes: • Revegetación con especies herbáceas. • Revegetación con especies arbustivas. • Reforestación con especies arbóreas.
Beneficios	• Reducir los procesos de erosión de suelos. • Aumentar la infiltración del agua de lluvia. • Minimizar la formación de escurrimiento. • Recuperar la cubierta vegetal que se perdió por las actividades de desmonte. • Mantener la diversidad de especies vegetales.

Revegetación con herbáceas

Esta técnica de revegetación tendrá que ser valorada por el especialista ambiental para definir si las condiciones de los sitios a intervenir ameritan como primera alternativa la revegetación con especies herbáceas o si la calidad de los suelos está en condición de que se adapten especies de porte arbustivo o arbóreo.

Revegetación con especies arbustivas

La revegetación con especies arbustivas en sitios afectados por obras tiene que valorarse antes de ser propuesta, ya que en ocasiones al querer rehabilitar un sitio que tiene un alto impacto en el suelo es indispensable iniciar con el establecimiento de especies herbáceas para enriquecer el horizonte de orgánico y posteriormente adentrar a aquellas especies arbustivas que requieren de un suelo más profundo para su adaptación. Sin embargo, al querer iniciar la rehabilitación de estas áreas con ejemplares arbustivos deben de considerarse especies secundarías que estén acostumbradas a baja concentración de nutrientes.

Reforestación con especies arbóreas

La reforestación con especies forestales arbóreas tiene que realizarse en terrenos con una buena capa de suelo orgánico, por lo tanto, para atender una reforestación en áreas que han sido impactadas por caminos u otro tipo de obra es indispensable valorar si las condiciones del suelo harán viable su establecimiento, de lo contrario se tiene que considerar el mejoramiento del suelo.

3.1.2.2 Bancos de préstamo de materiales y plantas de trituración

Las técnicas recomendadas para realizar un proyecto de revegetación en bancos de préstamo y plantas de trituración se describen en la siguiente Tabla.

Tabla 26
Técnicas de revegetación recomendadas para bancos de préstamo de materiales y plantas de trituración.

Bancos de préstamo y plantas de trituración	
Definición	Los bancos de préstamo de materiales son las excavaciones a cielo abierto que se encuentran en estado natural en principio, donde son extraídos y procesados los materiales utilizados comúnmente en la construcción de las carreteras, tales como suelos, gravas, arenas, etc.
Características por valorar antes de proponer la revegetación	**Topografía:** es un factor importante para conocer las diferentes formas del terreno. **Tipo de suelo:** es importante conocer la profundidad, textura, capacidad de retención de humedad y capa orgánica del suelo. **Grado de compactación del suelo:** es importante la valoración de este factor ya que, con base en los resultados obtenidos, se podrán proponer actividades de descompactación o mejoramiento del suelo previos a la revegetación. **Tipo de vegetación:** considerando el reconocimiento de las especies vegetales que se desarrollan en la zona aledaña se propondrán especies que se adapten al sitio a revegetar.
Técnica de revegetación	Con base en las características que presente el banco que se pretenda revegetar tendrá que ser la técnica de revegetación que se proponga, teniendo como opciones las siguientes: • Revegetación con especies herbáceas. • Revegetación con especies arbustivas. • Reforestación con especies arbóreas.
Beneficios	• Recuperación de la cubierta vegetal y la flora característica de la zona donde se ubique el banco. • Minimización de los procesos erosivos. • Aumento de la infiltración y recuperar la calidad del agua. • Revertir la modificación a la topografía.

Revegetación con especies herbáceas

Dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el sitio que ocupaba el banco de material, se recomienda iniciar con actividades de revegetación con especies herbáceas nativas de la zona, esto por medio de siembra directa o por medio de la dispersión de suelo orgánico rescatado al momento de hacer la apertura del banco, ya que el suelo orgánico rescatado previo a las labores de explotación es una fuente rica en germoplasma de especies originarias del sitio afectado.

Revegetación con especies arbustivas

Las condiciones posteriores a la explotación de los bancos de materiales son muy pobres en suelo, ya que la topografía queda modificada significativamente y los suelos, que pueden ayudar al establecimiento de la vegetación, son muy bajos, por lo tanto, para logar una exitosa rehabilitación de estas áreas se recomienda utilizar especies capaces de adaptarse a condiciones de perturbación, es decir, que no demanden gran cantidad de nutrientes.

Reforestación con especies arbóreas

La técnica de reforestación con especies arbóreas es recomendable cuando haya pasado cierto tiempo y el proceso de sucesión ecológica en el sitio se vea reflejado, es decir, cuando ya se tenga la presencia de herbáceas y arbustos, para que estos ejemplares sirvan de apoyo para la adaptación de las especies arbóreas que se pretenden establecer.

3.1.2.3 Plantas de asfalto

A continuación se presenta una Tabla con las técnicas recomendadas para la revegetación de áreas afectadas por la instalación de plantas de asfalto.

Tabla 27
Técnicas de revegetación recomendadas para áreas afectadas por plantas de asfalto.

Plantas de asfalto	
Definición	Una planta de asfalto es un conjunto de equipos mecánicos y electrónicos en donde los agregados son combinados, calentados, secados y mezclados con asfalto para producir una mezcla asfáltica en caliente, que debe cumplir con ciertas especificaciones y que se utiliza para la construcción de superficies de rodamiento o carpetas.
Características por valorar antes de proponer la revegetación	**Topografía:** es un factor importante para conocer las diferentes formas del terreno. **Tipo de suelo:** es importante conocer la profundidad, textura, capacidad de retención de humedad y capa orgánica del suelo. **Grado de compactación del suelo:** es importante la valoración de este factor ya que, con base en los resultados obtenidos, se podrán proponer actividades de descompactación o mejoramiento del suelo previos a la revegetación. **Tipo de vegetación:** considerando el reconocimiento de las especies vegetales que se desarrollan en la zona aledaña se propondrán especies que se adapten al sitio a revegetar.
Técnica de revegetación	Con base en las características que presente el área donde se estableció la planta de asfalto que se pretenda revegetar tendrá que ser la técnica de revegetación que se proponga, teniendo como opciones las siguientes: • Revegetación con especies herbáceas. • Revegetación con especies arbustivas. • Reforestación con especies arbóreas.
Beneficios	• Recuperación de la cubierta vegetal y la flora característica de la zona donde se ubique la revegetación. • Minimización de los procesos erosivos. • Aumento de la infiltración y recuperar la calidad del agua. • Revertir la modificación a la topografía.

Revegetación con especies herbáceas

Dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el sitio que ocupaba la planta de asfalto, se recomienda iniciar con actividades de revegetación con especies herbáceas nativas de la zona, esto por medio de siembra directa o por medio de la dispersión de suelo orgánico rescatado al momento de hacer la apertura del banco, ya que el suelo orgánico rescatado previo a las labores de explotación es una fuente rica en germoplasma de especies originarias del sitio afectado.

Revegetación con especies arbustivas

Al realizar el abandono de las zonas donde se ubican las plantas de asfalto se aprecia que son muy pobres en suelo, ya que la topografía queda modificada significativamente y los suelos, que pueden ayudar al establecimiento de la vegetación, son muy

bajos, por lo tanto, para logar una exitosa rehabilitación de estas áreas se recomienda utilizar especies capaces de adaptarse a condiciones de perturbación, es decir, que no demanden gran cantidad de nutrientes.

Reforestación con especies arbóreas

La técnica de reforestación con especies arbóreas es recomendable cuando haya pasado cierto tiempo y el proceso de sucesión ecológica en el sitio se vea reflejado, es decir, cuando ya se tenga la presencia de herbáceas y arbustos, para que estos ejemplares sirvan de apoyo para la adaptación de las especies arbóreas que se pretenden establecer.

3.1.2.4 Bancos de tiro

En la siguiente Tabla se describen las técnicas recomendadas para la revegetación de bancos de tiro.

Tabla 28
Técnicas de revegetación recomendadas para áreas afectadas por bancos de tiro.

Bancos de tiro	
Definición	Los bancos de tiro o de desperdicios son las áreas sin vegetación en las que se confinará el material excedente (desecho o desperdicio) del corte que se obtenga durante la construcción de la carretera o vía férrea y en ocasiones también se dispone en estas áreas parte del material de despalme y desmonte.
Características por valorar antes de proponer la revegetación	**Topografía:** es un factor importante para conocer las diferentes formas del terreno. **Tipo de suelo:** es importante conocer la profundidad, textura, capacidad de retención de humedad y capa orgánica del suelo. **Grado de compactación del suelo:** es importante la valoración de este factor ya que, con base en los resultados obtenidos, se podrán proponer actividades de descompactación o mejoramiento del suelo previos a la revegetación. **Tipo de vegetación:** considerando el reconocimiento de las especies vegetales que se desarrollan en la zona aledaña se propondrán especies que se adapten al sitio a revegetar.
Técnica de revegetación	Con base en las características que presente el banco de tiro que se pretenda revegetar tendrá que ser la técnica de revegetación que se proponga, teniendo como opciones las siguientes: • Revegetación con especies herbáceas. • Revegetación con especies arbustivas. • Reforestación con especies arbóreas.
Beneficios	• Recuperación de la cubierta vegetal y la flora característica de la zona donde se ubique el banco. • Minimización de los procesos erosivos. • Aumento de la infiltración y recuperar la calidad del agua. • Revertir la modificación a la topografía.

Revegetación con especies herbáceas

Dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el sitio que ocupaba el banco de tiro, se recomienda iniciar con actividades de revegetación con especies herbáceas nativas de la zona, esto por medio de siembra directa o por medio de la dispersión los materiales que ahí se depositen, ya que en ocasiones en esos sitios se dispone material producto del despalme que es rico en materia orgánica y por consiguiente presenta alta concentración de semillas.

Revegetación con especies arbustivas

Una vez que el banco de tiro es abandonado queda cubierto por material producto del despalme o desperdicio que fue retirado de la obra, por lo que se recomienda valorar si es necesaria su nivelación o si requiere un enriquecimiento de nutrientes, previo a establecer vegetación, además de que se tienen que considerar especies representativas de la zona y que sean de fácil adaptación.

Reforestación con especies arbóreas

La técnica de reforestación con especies arbóreas es recomendable cuando haya pasado cierto tiempo y el proceso de sucesión ecológica en el sitio se vea reflejado, es decir, cuando ya se tenga la presencia de herbáceas y arbustos, para que estos ejemplares sirvan de apoyo para la adaptación de las especies arbóreas que se pretenden establecer.

3.1.2.5 Campamentos y patios de maquinaria

En la Tabla siguiente se describen las técnicas recomendadas para la revegetación en sitios que fueron ocupados como campamentos y patios de maquinaria.

Tabla 29
Técnicas de revegetación recomendadas para áreas afectadas por campamentos y patios de maquinaria.

Campamentos y patios de maquinaria	
Definición	Los campamentos son instalaciones provisionales para alojar al personal que labora en la construcción de infraestructura carretera, generalmente constan de dormitorios, comedor y sanitarios, donde se concentran actividades del personal, generalmente, antes y después de la jornada laboral.
Características por valorar antes de proponer la revegetación	**Topografía:** es un factor importante para conocer las diferentes formas del terreno. **Tipo de suelo:** es importante conocer la profundidad, textura, capacidad de retención de humedad y capa orgánica del suelo. **Grado de compactación del suelo:** es importante la valoración de este factor ya que, con base en los resultados obtenidos, se podrán proponer actividades de descompactación o mejoramiento del suelo previos a la revegetación. **Tipo de vegetación:** considerando el reconocimiento de las especies vegetales que se desarrollan en la zona aledaña se propondrán especies que se adapten al sitio a revegetar.
Técnica de revegetación	Con base en las características que presenten los campamentos que se pretendan revegetar tendrá que ser la técnica de revegetación que se proponga, teniendo como opciones las siguientes: • Revegetación con especies herbáceas. • Revegetación con especies arbustivas. • Reforestación con especies arbóreas.
Beneficios	• Recuperación de la cubierta vegetal y la flora característica de la zona donde se ubiquen los campamentos. • Minimización de los procesos erosivos. • Aumento de la infiltración y recuperar la calidad del agua. • Revertir la modificación a la topografía.

Revegetación con especies herbáceas

Dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el sitio, se recomienda iniciar con actividades de revegetación con especies herbáceas nativas de la zona, esto por medio de siembra directa o por medio de la dispersión de suelo orgánico rescatado al momento de hacer la apertura del campamento, ya que el suelo orgánico rescatado previo a establecimiento de los campamentos es una fuente rica en germoplasma de especies originarias del sitio afectado.

Revegetación con especies arbustivas

Las condiciones posteriores al abandono de las zonas ocupadas por campamentos presentan un alto grado de compactación, por lo tanto, es recomendable realizar una roturación del suelo previo al establecimiento de las especies arbustivas.

Reforestación con especies arbóreas

La técnica de reforestación con especies arbóreas es recomendable cuando haya pasado cierto tiempo y el proceso de sucesión ecológica en el sitio se vea reflejado, es decir, cuando ya se tenga la presencia de herbáceas y arbustos, para que estos ejemplares sirvan de apoyo para la adaptación de las especies arbóreas que se pretenden establecer.

3.1.3 Sitios propuestos para revegetar como medida de compensación ambiental

A continuación se describen las técnicas recomendadas para las actividades de revegetación en predios propuestos para compensación ambiental, en atención a las autorizaciones ambientales a las que se tienen que sujetar los proyectos carreteros.

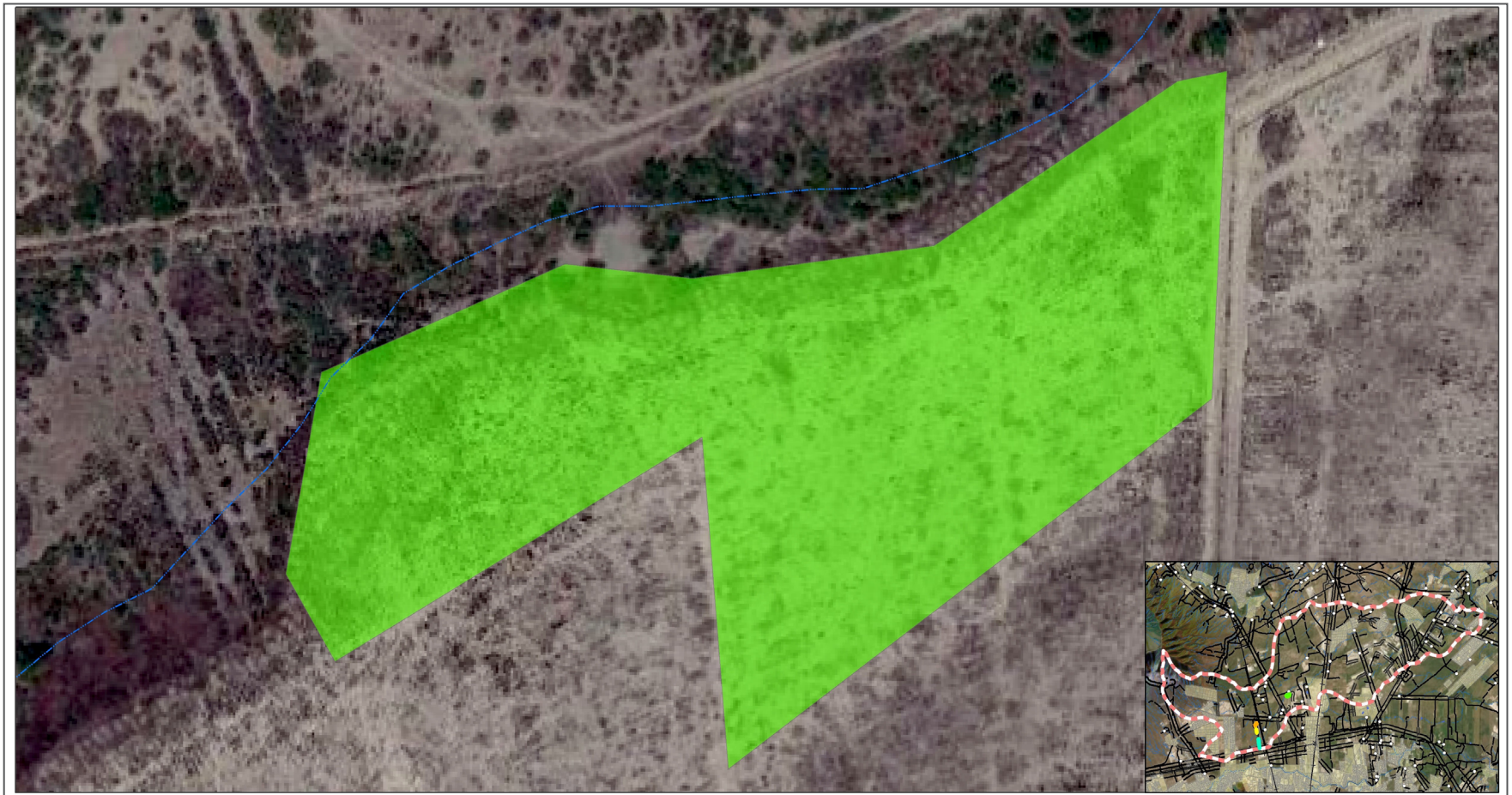
Tabla 30
Técnicas de revegetación recomendadas para sitios propuestos como medida de compensación ambiental.

Sitios propuestos para revegetar como medida de compensación ambiental	
Definición	Para compensar las afectaciones que se generan a la vegetación por la construcción de los proyectos carreteros como parte del expediente de los estudios ambientales que se presentan a la SEMARNAT se adjunta una propuesta de reforestación que se tendrá que desarrollar en predios inmersos en el Sistema Ambiental (SA), Sistema Ambiental Regional (SAR), o en la Cuenca Hidrográfica Forestal (CHF) según sea el caso, estas propuestas tendrán que dar atención a la recuperación de áreas degradadas que den continuidad a ecosistemas con vegetación forestal en estado de conservación primario o secundario.
Características por valorar antes de proponer la reforestación	**Topografía:** es un factor importante para conocer las diferentes formas del terreno donde se pretenda desarrollar la revegetación. **Tipo de suelo:** este factor tiene que ser analizado para conocer la profundidad, textura, la capacidad de retención de humedad y la capa orgánica. **Grado de compactación del suelo:** es importante la valoración de este factor ya que, con base en los resultados obtenidos, se podrán proponer actividades de descompactación o mejoramiento del suelo previos a la reforestación. **Tipo de vegetación:** la evaluación del tipo de vegetación en las zonas aledañas es importante ya que con base en esos datos se podrá constatar si la propuesta de revegetación cumple con el tipo de vegetación que se verá afectada por la construcción del proyecto carretero.
Técnica de revegetación	Con base en las características que presente el área propuesta tendrá que ser la técnica de reforestación que se proponga, teniendo como opción la siguiente: • Revegetación con especies arbóreas.
Beneficios	• Recuperación de la cubierta vegetal que ha sido alterada dentro del SA, SAR o CHF. • Reducir los procesos erosivos. • Aumento de la infiltración y recuperar la calidad del agua.

En la siguiente Figura se muestra en ejemplo de polígono fuera del derecho de vía seleccionado para revegetar como compensación ambiental.

Figura 31

Ejemplo de área propuesta fuera del derecho de vía para las actividades de revegetación dentro de la CHF.



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

Reforestación con especies arbóreas

La zona propuesta para llevar a cabo las actividades de reforestación tendrá que ser acorde a la recuperación de funciones ecológicas que ofrece el tipo de vegetación que se verá afectado por la implementación de todo proyecto, estableciendo especies nativas y representativas de la zona.

3.1.4 Sitios abandonados por rectificación de trazo

La modernización de carreteras implica en ocasiones el abandono de algunos tramos pavimentados, por lo cual surge la necesidad de implementar actividades de revegetación para recuperar los servicios ambientales del sitio. En la Tabla siguiente se presentan las técnicas recomendadas para recuperar los sitios referidos.

Tabla 31
Técnicas de revegetación recomendadas para áreas abandonadas por rectificación de trazo.

Sitios abandonados por rectificación de trazo	
Definición	Sitios abandonados cuando el trazo de alguna carretera se rectifica.
Características por valorar antes de proponer la revegetación	**Tipo de suelo:** es importante conocer la profundidad, textura, capacidad de retención de humedad y capa orgánica del suelo. **Grado de compactación del suelo:** es importante la valoración de este factor ya que, con base en los resultados obtenidos, se podrán proponer actividades de descompactación o mejoramiento del suelo previos a la revegetación. **Tipo de vegetación:** considerando el reconocimiento de las especies vegetales que se desarrollan en la zona aledaña se propondrán especies que se adapten a la zona a revegetar.
Técnica de revegetación	Con base en las características que presente el camino de acceso que se pretenda revegetar tendrá que ser la técnica de revegetación que se proponga, teniendo como opciones las siguientes: • Revegetación con especies herbáceas. • Revegetación con especies arbustivas.
Beneficios	• Recuperación de la cubierta vegetal y la flora característica de la zona donde se ubique el sitio a rehabilitar. • Aumento de la infiltración y recuperar la calidad del agua. • Evitar la propagación de especies exóticas invasoras.

Revegetación con especies herbáceas

La revegetación con especies herbáceas en sitios que aún están cubiertos por parte de la infraestructura carretera (pavimento) y que son abandonados, es recomendable el establecimiento de especies herbáceas para que de esta manera se inicie con la sucesión ecológica y en un futuro recolonicen especies arbustivas.

Revegetación con especies arbustivas

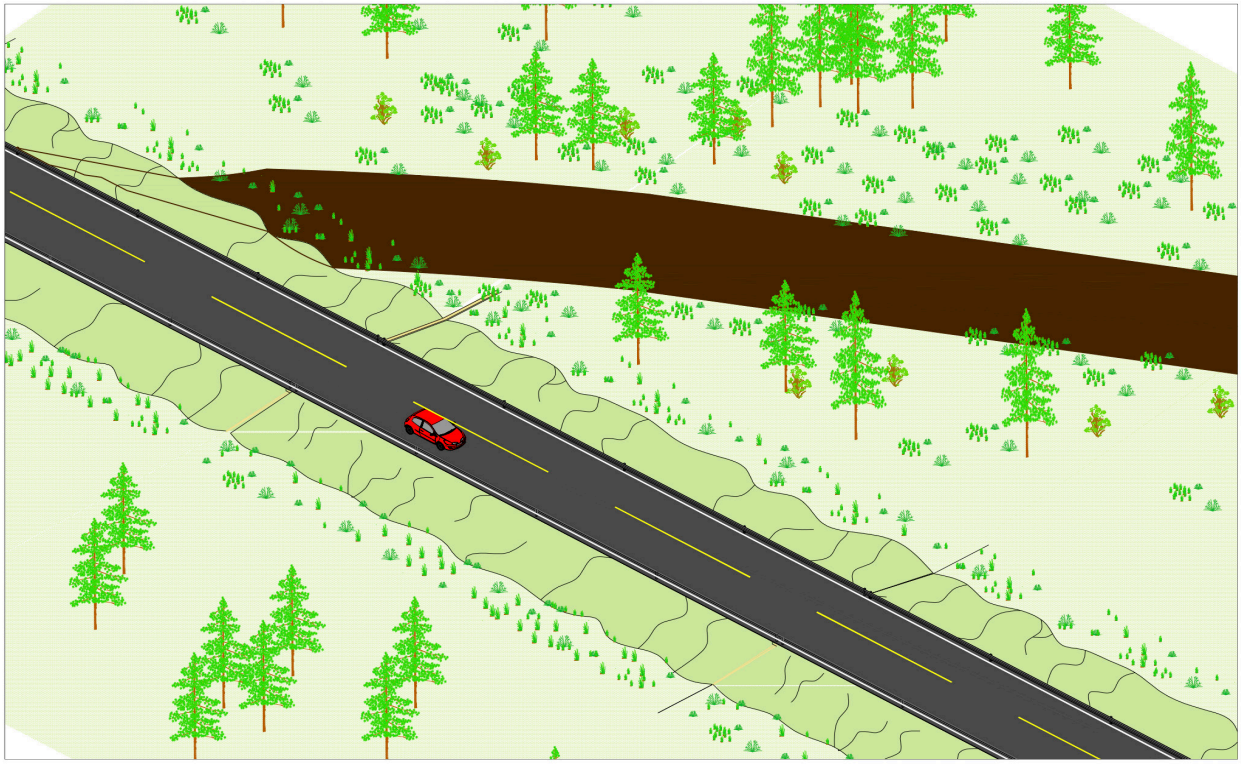
Esta técnica de revegetación será viable para sitios que previo al establecimiento de especies arbustivas se realice una descompactación del pavimento, además se tiene que considerar un mejoramiento del suelo, las especies a establecer tendrán que ser pioneras en los procesos de sucesión ecológica.

Reforestación con especies arbóreas

La reforestación tendrá que ser acorde a la recuperación de funciones ecológicas que ofrece el tipo de vegetación que se verá afectado por la implementación de todo proyecto, estableciendo especies nativas y representativas de la zona.

En la siguiente Figura se ejemplifica la revegetación de un tramo carretero abandonado por rectificación de trazo, mediante el uso de especies arbustivas y herbáceas.

Figura 32
Revegetación con especies herbáceas y arbustivas en sitios abandonados por rectificación de trazo.



3.2 Aprovisionamiento de insumos para la revegetación

En un buen proyecto de revegetación se tiene que considerar la forma en cómo se van a adquirir las plantas a utilizar en la plantación, por lo tanto, dependiendo de los objetivos de la revegetación se deben contemplar distintas formas de aprovisionamiento de planta, como son:

- Rescate de plantas, semillas o esquejes de especies nativas.
- Compra de plantas.
- Propagación de plantas en vivero.

El encargado de realizar la propuesta de revegetación tendrá que hacer un análisis del costo-beneficio para definir la forma de adquisición de planta más apropiada.

3.2.1 Rescate de plantas, semillas y esquejes de especies nativas

En las manifestaciones de impacto ambiental o estudios técnicos justificativos se realizan estudios de vegetación con la finalidad de evitar que el trazo del camino a construir pase por áreas destinadas a la conservación, poblaciones de especies vegetales protegidas por la ley (NOM-059-SEMARNAT-2010), o especies que tengan alguna relevancia cultural para las comunidades antrópicas circundantes. En caso de que esto sea inevitable la SEMARNAT suele establecer como medida de mitigación, la implementación de un plan de rescate de plantas independientemente de su forma de vida (árbol, arbusto, hierba, epífita, etc.). El rescate de plantas debe realizarse antes de que comiencen los trabajos de tala a lo largo del trazo definitivo. Por el costo de extracción, en el caso de los árboles y arbustos se suelen trasplantar plántulas o juveniles de talla pequeña. Sin embargo, cuando se trata de individuos con relevancia cultural deberá realizarse el rescate a pesar de los costos. Muchas orquídeas y cactáceas están en la NOM-059-SEMARNAT-2010, por lo que preferentemente deberían ser rescatadas del trazo del camino. Otras consideraciones que deben tomarse en cuenta para tomar esta decisión son: rescatar especies de difícil propagación o lento crecimiento. Por otra parte, la extracción de plantas a lo largo del trazo del camino, también puede ser una buena alternativa para obtener una gran cantidad de herbáceas incluyendo a las epífitas.

Las plántulas (árboles y arbustos) o plantas (orquídeas, cactáceas, bromelias) pueden llevarse a un vivero para su recuperación y emplearse posteriormente en el proyecto de revegetación. El uso de estás plántulas es una alternativa viable a la siembra directa y a las plántulas y esquejes propagados en vivero. La propagación de las plantas nativas se complica cuando es difícil o imposible colectar o usar semillas para la producción de plantas. Puede ser que la especie en cuestión no produzca semillas o las produzca irregularmente, puede ser que las semillas no alcancen la madurez o no sean viables, el lapso en el que las semillas se producen es muy corto, o las semillas pueden haberse dispersado antes de que comience el plan de colecta.

La utilización de plantas nativas tiene algunas ventajas. Al igual que los esquejes, las plántulas nativas pueden estar disponibles inmediatamente, por lo que se tienen menos gastos relacionados con el vivero. Puede ser una estrategia efectiva para obtener una gran cantidad de plántulas en relativamente poco tiempo (Hoag, 2003). Si la reproducción de las plantas es exitosa con rizomas, el trasplante puede ser el método más eficiente y efectivo para restablecer estas especies (Steed y DeWald, 2003). La supervivencia de las plantas silvestres puede complicarse porque cuando se realiza el trasplante, las plantas se estresan y pueden fallecer. Las plantas rescatadas frecuentemente tienen un sistema radical más pequeño que las especies cultivadas, en muchas ocasiones éste no se puede extraer completo. El éxito de los rescates requiere experiencia, habilidad, un manejo y almacenamiento adecuado y cuidados apropiados de las plantas, antes y después del trasplante.

Aunque las plantas rescatadas pueden proporcionar una oportunidad para establecer rápidamente plantas en relativamente poco tiempo, varios factores deberían ser considerados en el proceso de planeación porque podrían impactar su disponibilidad. Se deben establecer las locaciones que proporcionen el número de plantas requeridas; las plantas rescatadas pueden ser extraídas de su sitio y transportadas a un vivero, trasplantadas a una bolsa o contenedor y cultivadas para su uso en el proyecto de revegetación; el establecimiento o renta del vivero debe realizarse antes de realizar el rescate de plantas; la permanencia en el vivero de las plantas rescatadas puede llevar uno o más años dependiendo de la fecha de construcción del proyecto y el programa de trabajo de la revegetación.

Figura 33
Rescate de plantas nativas del bosque mesófilo de montaña a lo largo del trazo de la autopista México-Tuxpan, tramo Tejocotal-Nuevo Necaxa, en el estado de Puebla.



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

Cuando los tiempos de ejecución del proyecto permitan el rescate de germoplasma (semilla), primeramente, se tendrá que considerar la selección de árboles “padre”, los cuales tendrán que ser individuos sanos y vigorosos, libres de plagas y enfermedades. Una vez identificados los individuos proveedores de las semillas, el encargado de la ejecución del rescate tendrá que definir las características de los frutos o semillas a extraer, éstos deberán tener un buen estado de madurez para que la viabilidad de la semilla sea buena y por consiguiente el porcentaje de germinación sea exitoso.

Cuando se pretenda realizar el resguardo de semilla para ser sembrado directamente en campo, el técnico responsable del rescate tendrá que considerar los insumos necesarios para el envasado, ya que el germoplasma de especies requiere diferentes tratamientos y manejo.

El recate de esquejes es otra técnica que se puede implementar para el rescate de especies de flora silvestre, sin embargo, no aplica para todas las especies. Cuando el ejecutor de las actividades de rescate opte por esta técnica, previo a toda actividad deberá tener acondicionada un área de confinamiento temporal (vivero rústico) ya que cuando se realiza el rescate por medio de esta técnica los ejemplares requieren mayor cuidado y curación, y tendrá que ser en este espacio donde se les den los cuidados necesarios. Además, se tendrá que contar con suficiente sustrato para que en el vivero rústico se realice el embolsado y plantación de los ejemplares rescatados.

A continuación se describen algunos criterios que tienen que ser considerados cuando se opte por el rescate de plantas para las actividades de revegetación:

- **Localización de áreas de colecta de plantas rescatadas.** Los sitios potenciales para obtener plantas rescatadas pueden ser identificados a través de recorridos de campo, durante la fase de evaluación de la vegetación a lo largo del camino. Debe evitarse extraer plantas en sitios en los que el suelo sea susceptible a la erosión. Estas áreas deben ubicarse en un mapa y tanto éstas como su vegetación deben ser evaluadas en los siguientes puntos:
- **Accesibilidad.** El apropiado manejo de las plantas rescatadas durante su remoción y transporte es un factor crítico para asegurar su supervivencia. Las plántulas de algunas especies pueden ser manejadas exitosamente como se hace en la producción de plantas a raíz desnuda. En otros casos, la raíz puede requerir protección si el cepellón no está completamente contenido en el sustrato. Es necesario que los sitios de colecta sean accesibles por medio de caminos. Los permisos para remover las plantas deben obtenerse previamente en la SEMARNAT.
- **Viabilidad.** Las áreas con bosques sanos deben ser designadas como sitios de colecta. Los sitios deben contener materiales sanos, vigorosos y de tamaños adecuados (St John *et al.*, 2003). Hojas atrofiadas, un color incorrecto del follaje y un pobre crecimiento anual son indicadores de estrés, estas plantas no deberían ser colectadas. Las plantas únicamente deberían ser extraídas de los sitios que muestran buena regeneración en el área (Hoag, 2003). Determinar la viabilidad del material colectado y el tiempo de uso, debe ser completado antes de la selección de los sitios de colecta. Es importante trasplantar las plantas rescatadas en un ambiente de crecimiento apropiado. Existen plantas heliófilas (requieren luz directa) como los pinos, y otras que son umbrófilas (requieren luz indirecta) como las camedoras.
- **Genética.** Una de las desventajas o limitaciones de usar plantas silvestres rescatadas, o de cualquier propagación asexual, es el potencial para restringir la diversidad genética de la población de la planta. Para evitar esto es recomendable identificar varios sitios en una amplia zona, esto ayuda a capturar la variación heredada y la ambiental. Los sitios deben ser cuidadosamente seleccionados. Antes de la colecta es necesario determinar si las especies son

monoicas (las estructuras masculinas y femeninas están en la misma planta), o dioicas (las estructuras masculinas y femeninas están en plantas diferentes). Si las especies de interés son dioicas, se deben colectar plantas masculinas y femeninas, en las mismas proporciones para asegurar que se presentará la reproducción sexual.

Esta sección del Manual brinda una ayuda para determinar las especies de plantas que deben ser contempladas en el rescate, así como la forma de extracción y los cuidados que estas plantas deben tener al llegar al vivero.

A continuación se presenta el procedimiento para llevar a cabo el rescate de plantas a lo largo del trazo de caminos o vías férreas.

- **Localización y reconocimiento de las plántulas en el campo.** Previamente se recurre a la descripción de las especies de interés previamente realizada. Ésta incluye las estructuras vegetativas más evidentes como hojas, corteza, forma del árbol, altura; y sexuales como flores, frutos y semillas. Especies protegidas (NOM-059-SEMARNAT-2010), de difícil propagación o lento crecimiento.
- **Extracción de las plantas de campo.** Los suelos que tienen horizontes orgánicos profundos suelen mantenerse húmedos una buena parte del año, condición propicia para realizar la extracción de las plantas de interés. Sin embargo, si el suelo está seco (si levanta polvo) será necesario humedecer alrededor de la planta antes de llevar a cabo el trasplante. En el suelo se delimita un espacio con una pala recta de punta o de espada. La pala se hiende alrededor de la plántula que se desea extraer marcando el límite de lo que será el cepellón temporal. La profundidad a la que se hiende la pala y el tamaño del cepellón varían dependiendo del tamaño de las plantas, de tal forma que se establecieron las siguientes dos categorías (Tabla 32).

Tabla 32
Recomendaciones para definir la profundidad y el tamaño del cepellón en función del tamaño de la planta a rescatar.

Tamaño de las plántulas	Tamaño del cepellón
Plantas de 15 a 35 cm de altura	Ancho 12 cm por 20 cm de alto
Plantas de 35 a 100 cm de altura	Ancho de 18 cm por 25 cm de alto

- **Hacer palanca hacia arriba con la pala para extraer el cepellón.** Posteriormente se puede sacudir la planta para quitar una parte del suelo y se pueden ir acomodando en una bandeja grande (raíz desnuda). Para evitar que las raíces de las plántulas se deshidraten por el aire o insolación, se pueden hacer manojos con varias plantas y envolver con una película plástica (como la que se utiliza para envolver alimentos) o una franela húmeda. Esto es importante ya que la exposición de las raíces al aire puede ocasionar una recuperación lenta de la plántula o incluso su muerte.

- **Traslado de plántulas al vivero.** Una vez que se han acumulado varias plántulas se trasportarán al vivero. La extracción de las plantas a raíz desnuda ocasiona que las bandejas con las plantas tengan poco peso y puedan ser trasladadas a los vehículos que las llevarán al vivero. Las bandejas deben acomodarse en el camión de tal manera que se puedan estibar varios niveles. Durante el traslado, las plantas deben estar completamente protegidas porque el viento las deshidrata.
- **Manejo de plantas al llegar al vivero.** Las plántulas provenientes del campo se colocan en un área de descarga, posteriormente se clasifican por especie y se distribuyen en las diferentes platabandas. La función de las platabandas es proteger a las plántulas de los excesos de agua por lluvia, insolación y viento. Las plantas extraídas del campo están estresadas y son susceptibles de ser afectadas por estos factores. Las plantas rescatadas deben colocarse en platabandas con malla sombra (e.g. que bloquee el 80% de la luz) la sombra generada asegura la protección de las plantas. Debe establecerse la superficie que será cubierta con sombra. Las plantas rescatadas deben regarse continuamente para evitar su deshidratación.

3.2.2 Compra de plantas

Cuando el objetivo de la revegetación es una rehabilitación en la que no necesariamente se tienen que establecer especies nativas, las plantas requeridas (exóticas) pueden comprarse en viveros cercanos al proyecto. Una ventaja que tienen las especies nativas sobre las exóticas es su capacidad para tolerar las sequías. Estas especies requieren menos agua y pueden sobrevivir por periodos de tiempo más largos que las especies exóticas. Pueden sobrevivir sin la necesidad de implementar un sistema de riego, que de implementarse elevaría los gastos enormemente. Las plantas exóticas requieren fertilización, una vez que las plantas han sido establecidas y requieren mantenimiento más frecuentemente. Particularmente, requieren del uso de pesticidas y otros químicos que degradan el suelo. Las plantas nativas contribuyen a mantener la biodiversidad porque muchas especies de aves, insectos y murciélagos se alimentan del néctar de estas flores al mismo tiempo que las polinizan. Estos aspectos y funciones de las plantas nativas hacen que tengan un bajo costo-efectividad, mayor sostenibilidad, menor mantenimiento y aportan belleza estética-paisajista. Cuando el objetivo de la revegetación es una revegetación con especies nativas, lo más recomendable es propagarlas en un vivero rústico, porque generalmente es difícil encontrar un vivero que se dedique a la propagación de plantas nativas. Los costos se pueden incrementar si los viveros se encuentran lejos de los sitios de reforestación y las plantas podrían estresarse si no están adaptadas al clima local.

El momento en el que se están realizando las actividades de rescate de plantas, es una oportunidad que se puede aprovechar para eficientar la colecta de semillas y esquejes de las especies de árboles, arbustos, hierbas y pastos que se requieren en el proyecto de revegetación/reforestación. De igual forma, el momento en el que se está realizando la tala de árboles puede aprovecharse para recolectar frutos y semillas. Normalmente, estas estructuras reproductivas se localizan en las partes altas de los árboles y los técnicos especialistas deben subirse a ellos para colectarlas. Cuando se

talan los árboles, los frutos y las semillas pueden colectarse fácilmente con unas tijeras de poda y llevarse al vivero para su procesamiento.

Las técnicas de colecta y procedimiento de semillas y esquejes se describen en la sección de propagación de plantas nativas en vivero.

3.2.3 Propagación de especies nativas en vivero

El material vegetal por propagar puede provenir del rescate de semillas o esquejes dentro del derecho de vía, o bien, de la colecta de germoplasma en zonas aledañas al proyecto.

La propagación de las especies que serán utilizadas en la revegetación puede ser desarrollada en algún vivero temporal que se establezca cerca del área del proyecto, considerando las siguientes actividades y recomendaciones.

3.2.3.1 Establecimiento de un vivero rústico

El vivero tiene como propósito la producción de plántulas de especies nativas (árboles, arbustos y hierbas) y el cuidado y mantenimiento de las plantas rescatadas a lo largo del trazo del camino.

Su instalación requiere de una inversión en equipo, mano de obra y preparación del terreno, disponibilidad de agua todo el año, además de contar con vías de acceso para que se transporten las plantas requeridas en la revegetación. Establecer un vivero puede ser costoso porque además de los insumos se deben pagar sueldos de los trabajadores, la renta de un terreno y construir la infraestructura necesaria para el buen funcionamiento del vivero. Una alternativa que podría disminuir costos para propagar las plantas requeridas es rentar una parte de un vivero ya establecido, que se localice cerca de los sitios a revegetar o reforestar.

En la siguiente Figura se puede observar el acomodo de las plantas rescatadas y el riego que se aplica para evitar el estrés hídrico.

Figura 34
Ejemplo de vivero rústico empleado para la propagación de árboles para la autopista México-Tuxpan, estado de Puebla.



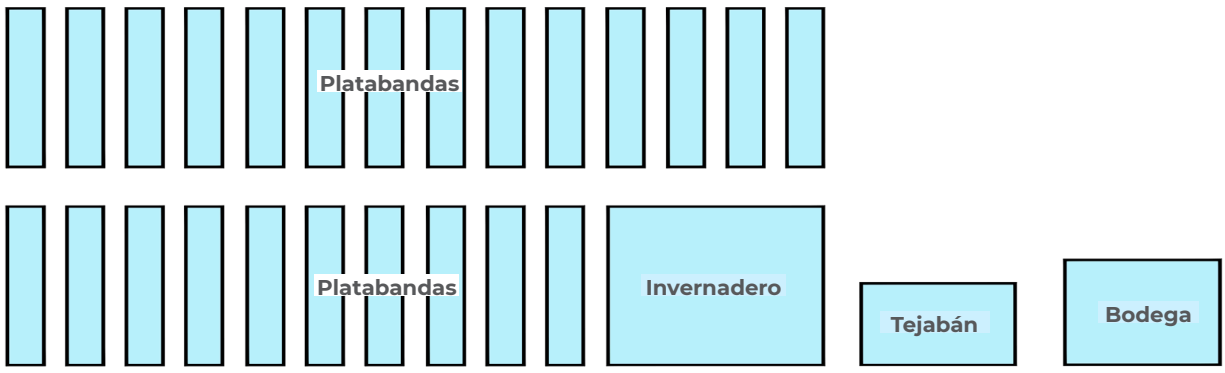
Fuente: Kerkus, S.A. de C.V.

Antes de llevar a cabo la construcción del vivero se debe hacer la limpieza del terreno, remover las piedras y eliminar toda la cubierta vegetal (malezas), se pueden dejar algunos árboles en pie para dar sombra, pero en caso de haber tocones, tendrán que ser removidos. La limpieza del vivero es una actividad importante ya que facilita las actividades cotidianas, evita la competencia entre las malezas y las plantas que se quieren propagar, además de facilitar el control de los insectos. El deshierbe se puede hacer a mano, con la ayuda de azadones o con maquinaria dependiendo del presupuesto. Una vez limpio el terreno se inicia su nivelación, haciendo el movimiento de suelo. Es aconsejable que el terreno elegido para instalar el vivero cuente con una ligera pendiente que asegure un buen drenaje sin que se promueva la erosión.

El vivero deberá contar con las siguientes instalaciones: oficina, área de embolsado, platabandas, pasillos, invernadero para la germinación de semillas y el enraizamiento de esquejes, almacén, herramientas (azadones, palas, rastrillos, carretillas, etc.), estacionamiento, sistema de riego (bombas, mangueras, regaderas, tanque de almacenamiento, etc.), sección para mezcla de sustrato y baños o letrina.

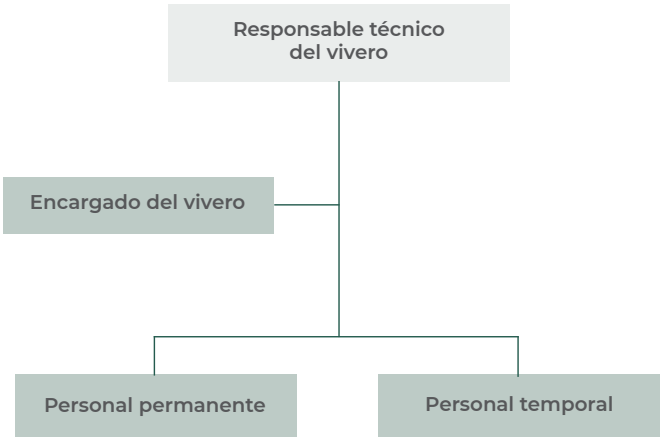
A continuación se presenta un ejemplo de la estructura recomendada para un vivero.

Figura 35
Croquis de un vivero rústico para la propagación de plantas y cultivo de las plantas.



Deberá designarse a un responsable técnico, el cual se encargará de supervisar todas las actividades que se lleven a cabo en el vivero. El encargado tiene como función coordinar al personal, ayudar en las tareas y vigilar permanentemente el vivero. Después de que se hayan propagado todas las plántulas para reforestar, el personal se encargará de darle mantenimiento, regar y aplicar fertilizantes y plaguicidas cuando sea necesario. El personal eventual varía dependiendo de las necesidades que se tengan. En la Figura siguiente se ejemplifica la estructura organizacional recomendada para un vivero rústico.

Figura 36
Organigrama del personal requerido para el funcionamiento de un vivero rústico.



A continuación se brindan algunas recomendaciones para las principales áreas del vivero rústico:

A. **Área administrativa.** Es una oficina en la que se realizan las funciones administrativas que incluyen desde la planeación hasta el control de las actividades, producción, entrada de plantas rescatadas, inventarios y la entrada y salida de plantas.
B. **Área de propagación.** Es recomendable construir un invernadero de madera con cubierta de plástico. En este se llevará a cabo la germinación de las semillas, tal como se muestra a continuación.

Figura 37
Área de propagación establecida para la autopista México-Tuxpan.



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

C. **Área de crecimiento.** Se deben construir platabandas para acomodar los envases que contienen las plántulas propagadas por semilla. Para protegerlas de la insolación particularmente en las primeras etapas de crecimiento, debe colocar una malla sombra. Las plantas rescatadas también deben mantenerse a la sombra sobre todo los primeros meses después de que las plantas fueron extraídas del campo. Algunas especies pueden ser umbrófilas, como *Podocarpus reichei,* árbol de bosque mesófilo que requiere para su óptimo desarrollo condiciones de baja luminosidad, por lo que se debe mantener permanentemente bajo sombra. Para su construcción se requiere de horcones y postes, alambre recocido, y malla sombra al 80%. En las especies heliófilas sólo se necesita la sombra al principio de la producción, cuando las plantas son pequeñas y sensibles, posteriormente ésta debe removerse para que el tallo de las plantas pueda endurecerse. La sombra se irá construyendo conforme se vaya necesitando, esto evita que el material se desperdicie.

   Las platabandas se recomiendan de un ancho de 1.20 m, los pasillos entre éstas de 70 cm y los pasillos principales entre 2 y 4 m. Este tamaño permite manipular las plantas para su deshierbe u otras actividades culturales. Los 70 cm de ancho en los pasillos permiten el paso de carretillas sin que se lastimen las plantas.

D. **Área de embolsado (tejabán).** Puede ser una superficie de 50 m^2 protegida del viento y la lluvia en la que se lleva a cabo la mezcla del sustrato, el llenado de bolsas con tierra y el trasplante.

E. **Almacén.** Se necesita construir un almacén para guardar los insumos y herramientas necesarias para las actividades del vivero. Asimismo, se pueden almacenar o poner a secar las semillas que se vayan a emplear para la producción de plantas. Como se trata de una infraestructura temporal, el almacén se puede construir junto a la oficina con materiales de madera, en un lugar fresco y techado para impedir la infiltración del agua de lluvia. Se puede ubicar en la entrada al vivero para su fácil acceso y eficiente transporte de materiales y herramientas al lugar de trabajo.

3.2.3.2 Propagación de plantas nativas por semilla

Posterior al establecimiento del vivero se tienen las actividades para la propagación de plantas, etapa en la cual se tienen que considerar las siguientes actividades:

A. **Planeación.** La colecta de semillas debería ser una de las primeras tareas a considerar cuando comience el plan de revegetación. Dos o tres años, frecuentemente, son necesarios para localizar, colectar, limpiar y probar semillas silvestres. Además del tiempo que se requiere para producir las plantas en vivero.

   Los contratos de colecta de semillas generalmente se concretan antes de la época de crecimiento para que la compañía contratada tenga tiempo para localizar y evaluar las áreas de colecta, las poblaciones, y la cosecha potencial de semillas. Las semillas son monitoreadas periódicamente y colectadas cuando maduran. Las semillas cosechadas son limpiadas, probadas y almacenadas antes de enviarse al vivero.

B. **Determinación de la cantidad de semillas necesarias para la producción**. La producción de plantas nativas en vivero con la capacidad de sobrevivir y crecer en sitios restaurados requiere varios años, por lo que frecuentemente es necesario desarrollar contratos para asegurar que se están propagando los materiales genéticos adecuados y que las plantas resultantes son de buena calidad, y que sobrevivirán y crecerán cuando sean plantas en los sitios de revegetación.

   Las necesidades de un proyecto de revegetación se determinan tempranamente, en los estados de planeación, incluyendo el número de plantas, tipos de especies y tamaño de plantas. Desde que se genera la lista de especies hasta localizar las fuentes de semillas, puede transcurrir al menos un año. Es recomendable que antes de que el sitio de construcción esté listo para la plantación, se gestione un contrato para empezar a desarrollar las plantas. Una vez que las semillas y otros materiales vegetales están en el vivero, entonces comienza la siembra, el trasplante y el enraizamiento de esquejes. La etapa de crecimiento puede extenderse de uno a dos años dependiendo de la especie.

   La cantidad de semillas que se tienen que colectar para propagar plántulas en un vivero, se basará en una estimación de la cantidad de plántulas que se necesitan, el porcentaje de germinación de semillas, el porcentaje de pureza de las semillas, el peso de las semillas y un factor que se aplica en la producción de vivero. El factor de vivero es una predicción del porcentaje de la viabilidad de las semillas. Los técnicos deben aportar los factores para cada especie o información de la cantidad de semillas que deben colectarse. Los factores de vivero frecuentemente son menores al 50 por ciento.

C. **Selección de materiales para propagar las plantas.** La utilización de especies nativas, adaptadas a las condiciones climáticas prevalecientes en la zona, contribuirá a obtener mejores resultados en la revegetación, así como en la conservación del germoplasma de las especies nativas *in situ*. La selección de las especies apropiadas, de los sitios de colecta de semillas y el contar con las plantas suficientes para el proyecto de revegetación, requiere de una planeación previa que lleva tiempo. La obtención de materiales adaptados genéticamente puede implicar la colecta de materiales vegetales en el área geográfica cercana al sitio del proyecto, varios años antes de la implementación del proyecto. Dependiendo de las especies y del ambiente, las semillas se establecerán y dispersarán más rápidamente.

D. **Localización de plantas para colecta.** Los sitios de colecta potencial se pueden identificar cuando se realizan los muestreos de los sitios de referencia. Las locaciones de colecta pueden establecerse con la ayuda de un botánico familiarizado con la vegetación local. La colecta de semillas debe hacerse de múltiples y bien distribuidas locaciones dentro de un área biogeográfica definida. La diversidad genética puede ser mejorada si se colectan aproximadamente las mismas cantidades de las zonas de colecta aprobadas y se colectan de un amplio número de plantas parentales (50 o más es óptimo). Las poblaciones de plantas que crecen en sitios con condiciones ambientales adversas pueden ser buenas candidatas debido a su presión de selección natural y adaptaciones genéticas que pueden producir descendientes mejor adaptados y más compe-

titivos (Strauss *et al.*, 2006, Leger, 2008). Generalmente, no más del 50% de las semillas cosechadas deberían ser colectadas en un mismo año, y debe evitarse repetir las colectas en años subsecuentes para preservar la viabilidad de las poblaciones nativas y la vida silvestre dependiente.

Los sitios de colecta deberían estar libres de cualquier planta invasiva para evitar que se contaminen las semillas. Una vez localizados los sitios de colecta, deben registrarse las coordenadas GPS y marcar el sitio para poder acceder al sitio.

Es importante mencionar que antes de realizar la colecta de semillas es necesario tramitar los permisos de colecta en la SEMARNAT.

E. Colecta de semillas. Las semillas silvestres pueden ser colectadas de comunidades nativas de pastos, arbustos, árboles y plantas de humedales, que se encuentren cerca de los sitios del proyecto, u otras localidades determinadas previamente. El objetivo primario de seleccionar semillas silvestres es obtener individuos genéticamente adecuados. Debido a que la propagación de plántulas depende de la disponibilidad de semillas silvestres, la colecta de propágulos es una de las tareas más relevantes del plan de revegetación y debe iniciarse tan pronto como sea posible. Dependiendo del propósito, el tiempo que puede invertirse en colectar las semillas silvestres puede llevar de 2 a 3 años antes de sembrar o plantar el sitio del proyecto. Se requieren algunas estaciones de crecimiento para establecer las plantas en el vivero o para crecer semillas en el campo.

Las especies de pastos, hierbas y arbustos y árboles secundarios frecuentemente se siembran directamente en los sitios perturbados. Con la finalidad de obtener más suficientes semillas para la siembra directa, las colectas de semillas silvestres pueden incrementarse propagándolas en vivero o en campos agrícolas. Por el contrario, las semillas de arbustos y árboles primarios, generalmente no se pueden sembrar directamente en sitios perturbados, se envían a viveros para propagar plántulas, y se trasplantan al campo en uno o tres años dependiendo de las existencias y de las especificaciones del tamaño recomendable para plantarse. Las semillas de los humedales como los juncos (*Juncus sp.*), son frecuentemente colectadas para siembra y producción de plántulas.

Los planes de revegetación raramente finalizan antes de que las semillas sean colectadas. En el proyecto de planeación, por lo menos se deberían haber identificado las unidades de revegetación, descrito las áreas de referencia, determinar las especies a propagar y completado un estudio de la construcción del sitio, para determinar la cantidad de área a ser revegetada. La cantidad y la ubicación de las semillas se determinarán con base en los primeros estudios.

La colecta de semillas silvestres puede ser costosa. Se requieren varios recorridos para monitorear y colectar las poblaciones de interés. Cada especie produce semillas en un periodo reducido de tiempo y muchas especies no lo hacen al mismo tiempo, por lo que se dificulta la colecta. Además, muchas especies no producen semillas consistentemente cada año, se requieren algunos años para generar colectas adecuadas.

Antes de colectar semillas silvestres o establecer contratos de colecta, es necesario obtener los permisos de colecta en la SEMARNAT, y determinar si otra fuente de semillas apropiadas genéticamente, pueden ser disponibles para el

proyecto. Frecuentemente, los productores comerciales que tengan semillas almacenadas cerca del área del proyecto, especialmente las especies que se emplearán en la revegetación.

Solamente deben colectarse las semillas viables y que son lo suficientemente maduras. Las semillas alcanzan la madurez cuando el embrión se ha desarrollado completamente y no hay evidencia de insectos, enfermedades o algún tipo de daño. La madurez de las semillas con frutos carnosos (muchos arbustos y árboles), se evidencia con el cambio de color, de verde a rojo, morado, o blanco); sabor (incremento de azucares cuando madura), o dureza (son más suaves cuando maduran). El viento dispersa las semillas, como muchas de las coníferas, usualmente cambian de verde a café cuando maduran. En el caso de los pastos, se puede implementar una prueba muy sencilla en el que la madurez de las semillas se evalúa dependiendo de su respuesta al ser oprimida, una forma más efectiva es hacer un corte para observar el desarrollo del embrión al microscopio. Debido a que la madurez de las semillas depende del clima local y microclima, es necesario realizar recorridos para monitorear el momento en el que las semillas alcanzan su madurez. En la figura que se presenta a continuación, se da un ejemplo de semilla que ha alcanzado su madurez y está en óptimas condiciones para ser colectada.

Figura 38
Semillas de *Podocarpus reichi*, árbol del bosque mesófilo de montaña, el arilo[2] rojo indica que las semillas han alcanzado su madurez.



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

[2] Cobertura carnosa de ciertas semillas.

Las técnicas de colecta dependerán de las semillas que sean colectadas. Las especies de pastos y hierbas pueden ser cosechadas a mano, golpeando o azotando los tallos y colocándolas en bolsas o contenedores. Los contenedores deben ser de materiales que permitan el flujo de aire como papel o una malla fina. No deben utilizarse bolsas o contenedores de plástico a menos que inmediatamente se transporten al vivero y se pongan a secar a la sombra.

Las semillas de muchos arbustos frecuentemente se colectan, colocando una bolsa bajo la planta y se agita la planta o se golpean algunas ramas con un palo. Las semillas de algunos arbustos maduran y permanecen en la planta, otros se deshacen cuando maduran y deben colectarse antes de que se dispersen las semillas. Los recorridos de campo pueden ser costosos, así que una alternativa es colocar una bolsa de malla en las inflorescencias antes de que maduren, y cerrarla por el ápice con un hilo resistente. Al final de la temporada, las semillas maduras caerán dentro de las bolsas. Preferentemente, las semillas no deberán colectarse en el suelo, aunque en algunos casos se suele dejar una tela o un papel resistente para colectarlas. El colector de semillas que se contrate deberá especificar los métodos idóneos de colecta.

Algunos datos sobre el o los sitios de colecta que deben documentarse son:

- La especie (nombre científico).
- Coordenadas geográficas (GPS), latitud/longitud o UTM.
- Fecha de la colecta.
- Nombre del colector.
- Número de poblaciones colectadas.
- Elevación.
- Nombre del proyecto del camino.

Cada bolsa o contenedor con semillas colectadas deberá ser claramente identificado en el campo. Para evitar perder la identidad de los lotes de semillas es necesario colocar, además de la etiqueta externa, una etiqueta anexa en el interior de la bolsa.

A continuación se presenta un ejemplo del almacenamiento de semillas rescatadas para su posterior germinación en el vivero.

Figura 39
Almacenamiento de semillas.



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

F. **Limpieza y pruebas de las semillas.** Las colectas de semillas deberían limpiarse de forma estándar para que pueda ser aplicado en el equipo de siembra de semillas para la producción de plántulas o aumento de semillas. El método de aplicación puede determinar el tipo de limpieza requerido. La siembra a mano puede necesitar semillas menos procesadas que una siembra con equipo. La limpieza de las semillas generalmente se completa en dos de tres pasos: 1) remover las semillas de conos o cubiertas (coníferas y algunas latifoliadas, arbustos y hierbas), 2) separar estructuras de las semillas, 3) remover todos los materiales que no sean semillas. En algunas especies de coníferas y muchos arbustos y especies de latifoliadas se requiere equipo especializado para romper los frutos o testas sin dañar las semillas. Se debe desprender estructuras como alas u otros apéndices que estén adheridas a las semillas, esto puede hacerse de manera mecánica, hasta alcanzar una alta pureza de semillas (más alta del 90%), o algún nivel específico para usar dependiendo de la especie y del uso que se pretenda darle al lote de semillas en lo particular. El nivel de pureza depende de la infraestructura que se vaya a emplear para la siembra. Cuando se empleen equipos de precisión, el nivel de pureza debe ser mayor que cuando la siembra es a mano.

   Las semillas limpias deberían ser probadas en cuanto a germinación, pureza, semillas por kilo y presencia de plantas invasivas. Las pruebas requieren que se colecten muestras representativas para cada lote. Las semillas usualmente se almacenan en recipientes sellados o bolsas. La cantidad de semillas necesarias para hacer las pruebas varía dependiendo de la especie. Idealmente, el muestreo de las semillas es realizado por una persona entrenada y certificada en este trabajo. La viabilidad de las semillas usualmente decrece cuando se almacenan por periodos prolongados. Las pruebas de las semillas deberían realizarse al menos un año antes de su siembra, para obtener la información de la germinación más precisa.

G. **Producción de semillas en vivero.** Muchos proyectos de revegetación requieren grandes cantidades de semillas de pastos y hierbas. La forma más común de obtener estas grandes cantidades es estableciendo campos de producción de semillas en el vivero o en parcelas agrícolas. En estos sitios las plantas pueden ser regadas, fertilizadas y pueden ser cuidadas para producir una gran cantidad de semillas y plántulas. Usualmente, las semillas se producen a finales del primero o segundo año. De esta forma, la producción de semillas puede ser sembrada directamente en las unidades de revegetación o almacenadas en un lugar fresco para emplearlas cuando se necesite.

   La propagación de pastos y semillas es muy eficiente, considerando los costos y las cantidades de semillas que pueden ser obtenidas de la producción de semillas silvestres en vivero. La eficiencia de las semillas a gran escala varía dependiendo de la especie, calidad de las semillas, cultivador y región geográfica. En la siguiente Figura se presentan ejemplos de siembra y germinación de semillas.

Figura 40
Germinación de semillas de *Pinus sp.*, en invernaderos y charolas.



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

3.2.3.3 Propagación de plantas nativas por esqueje

A menudo, el término esqueje se emplea para referirse a ramas jóvenes o de menor consistencia y estacas para tallos lignificados. El uso de esquejes puede ser una alternativa viable para propagar plántulas o sembrar semillas con la finalidad de reestablecer la vegetación nativa, y es el método más importante para propagar arbustos ornamentales y leñosos.

La propagación de esquejes es una técnica de multiplicación vegetal en la que se utilizan trozos de tallos, los que colocados en condiciones ambientales adecuadas son capaces de generar nuevas plantas idénticas a las plantas madre. Estas porciones son fitómeros, es decir, la menor porción formada por un nudo con la yema y una porción de los entrenudos superior e inferior que permite la multiplicación; plantadas bajo condiciones ambientales favorables se induce la formación de raíces y posteriormente se desarrolla el brote vegetativo, produciendo así una nueva planta independiente.

Los esquejes pueden ser obtenidos de colectas silvestres o de cultivos de plantas donadoras. Cuando el diámetro de un esqueje es menor a 2.5 cm y proviene de ramas, se trata de esquejes pequeños. Estos esquejes son empleados frecuentemente para enraizarlos en vivero (p. ej. *Sambucus spp.*). Cuando el material vegetal alcanza 2.5 a 7.5 cm de diámetro, se nombran estacas. Se emplean para hacer cercas vivas y deben tener una longitud de 1.20 a 1.80 m (p. ej. *Bursera simaruba* y *Gliricidia sepium*).

Los esquejes se emplean en proyectos de revegetación cuando las semillas y las plántulas son difíciles de obtener, cuando las semillas tienen bajos porcentajes de germinación, o cuando los esquejes son necesarios para aspectos biotecnológicos. La producción de semillas puede ser baja por diversas razones, incluyendo una pobre polinización, enfermedades y daños ocasionados por insectos. Otras especies producen semillas que son muy difíciles de germinar en vivero. Algunas especies de árboles producen semillas irregularmente y pueden pasar muchos años entre cosechas de semillas. Algunas semillas son difíciles de colectar porque son inaccesibles (se encuentran en las partes más altas de los árboles) o cuando la época de colecta es muy pequeña (*Croton draco*). Para estas especies el enraizamiento de esquejes puede ser la única opción viable y económica para propagar estas plantas.

A continuación se presentan recomendaciones para la propagación de plantas nativas por esqueje.

A. **Planeación.** Localizar las áreas con esquejes en el campo es una tarea aparentemente sencilla, sin embargo, puede complicarse por accesibilidad a propiedades privadas para obtener los esquejes, condiciones climáticas y baja calidad del material a propagar. Por estas razones deberían considerarse por lo menos un par de años para propagar grandes cantidades de esquejes de plantas silvestres. En grandes proyectos se requiere suficiente tiempo para conocer los sitios de colecta potencial y probar el potencial de enraizamiento del material empleado. Si el material es usado para producir esquejes enraizados en un vivero, el material debe ser colectado al menos un año antes de la instalación.

B. **Localización de áreas con esquejes.** La evaluación de la vegetación durante la fase de planeación es una oportunidad para localizar posibles fuentes de esquejes. Los sitios potenciales deben ser mapeados y evaluados por la proximidad y accesibilidad. No siempre las buenas fuentes de esquejes se localizan en el sitio del proyecto, por lo que es necesario revisar otras áreas dentro de la zona de semillas. Algunas veces los mejores sitios para colectar esquejes se localizan a algunos kilómetros del sitio del proyecto, lo cual puede incrementar un poco los costos. Los beneficios de colectar materiales de calidad pueden pesar más que los costos de transportación. El tamaño y peso de los materiales vegetales frecuentemente limita la colecta a áreas cercanas y accesibles a los caminos. Es posible colectar esquejes de calidad en el derecho de vía cuando se poda o aclarea, esto debe detectarse durante la evaluación de la vegetación.

   Algunos de los mejores sitios para colectar esquejes pueden encontrarse en propiedad privada, por lo que deberán obtenerse los permisos correspondientes antes de realizar la colecta. Cuando los predios sean propiedad federal, estatal o municipal, los trabajos deben coordinarse con las agencias respectivas.

C. **Viabilidad.** La calidad de los esquejes es un criterio que determina la selección de un sitio de colecta. También es importante determinar si las especies de interés son monoicas (individuos con estructuras masculinas y femeninas en la misma planta), o dioicas (las estructuras masculinas y femeninas se localizan en diferentes plantas). Si la especie es dioica, lo recomendable es colectar aproximadamente la misma cantidad de esquejes de plantas femeninas y masculinas, para promover la diversidad genética. El sexo de las plantas donantes es fácil de determinar en el periodo reproductivo, cuando las estructuras florales están completamente formadas y son más visibles (primavera). Para preservar la integridad genética, es recomendable colectar un mínimo de individuos donadores.

D. **Determinación del potencial de enraizamiento.** No todos los esquejes enraizarán y sobrevivirán cuando sean plantados en el sitio del proyecto. El éxito que se tenga en éstos depende del porcentaje de esquejes que formen raíces cuando se coloquen en un ambiente de crecimiento ideal (potencial de enraizamiento) y el porcentaje de esquejes viables (aquellos que enraizaron) que se establecen después de la estación de crecimiento (supervivencia potencial).

   El potencial de los esquejes para formar raíces es la base para determinar cuántos esquejes se requieren y la densidad a la que deben plantarse. Entre más bajo sea el potencial de enraizamiento, mayor cantidad de esquejes serán requeridos y se plantarán más estrechamente. El potencial de enraizamiento es afectado por diversos factores, entre los cuales destacan la especie, el genotipo, la fecha de colecta, la porción de la planta colectada, la edad del material, las condiciones del material y las técnicas de preparación.

   Sólo una pequeña cantidad de árboles y arbustos tiene la capacidad de propagarse a partir de esquejes enraizados. Preferentemente deben enraizarse en un vivero bajo condiciones ambientales controladas, antes de ser plantado en el sitio del proyecto. En cada especie existe variabilidad en el potencial de enraizamiento. Algunas plantas donadoras tienen un mayor potencial de enraizamien-

to que otras. El momento óptimo para colectar los esquejes un poco antes de que comience la estación de crecimiento. En algunas especies la colecta puede prolongarse hasta el otoño. Muchos esquejes se obtienen de tallos y ramas, sin embargo, en algunas especies el potencial de enraizamiento es mayor cuando los esquejes se obtienen de raíces. El potencial de enraizamiento cambia con la edad de la planta donadora. Muchas especies tienen un gran potencial de enraizamiento en nuevos crecimientos, mientras que en algunas especies se obtienen mejores resultados cuando los esquejes se obtienen de tallos o ramas más lignificadas. Las especies que tienen un alto potencial de enraizamiento en estructuras lignificadas son excelentes para la propagación por estacas (Darris y Williams, 2001). El material vegetal de las plantas donadoras puede estar afectado por insectos o enfermedades, esto puede reducir su potencial de enraizamiento. Algunas prácticas pueden mejorar potencialmente el enraizamiento. Un método fácil de implementar es sumergir los esquejes lo más pronto posible en agua antes de plantar, más aún si se aplican hormonas en el agua, es necesario hacer pruebas previas antes de aplicar el método a gran escala.

E. Determinación del potencial de supervivencia. No todos los esquejes que son enraizados sobreviven cuando son trasplantados en el campo o en el sitio del proyecto. El porcentaje de esquejes viables que enraízan y sobreviven un año después de la plantación, se conoce como potencial de supervivencia. Este potencial depende de factores como el clima, el suelo, el método de plantación y las prácticas de mantenimiento para cada proyecto. Éste puede ser determinado a través de pruebas de campo realizadas antes de plantar los esquejes.

El potencial de supervivencia es fuertemente influenciado por el potencial de pérdida de agua de cada sitio. Los sitios con bajo estrés hídrico en las primeras etapas de enraizamiento (finales de la primavera) tendrán altos potenciales de supervivencia. El potencial de supervivencia puede decrecer en zonas montañosas en las que el manto freático es profundo. En los suelos con una baja capacidad de retención de agua disponible tendrán un menor potencial de supervivencia que en aquellos con una alta capacidad de retención de agua.

Plantar esquejes en suelos compactados puede resultar en una baja supervivencia y una alternativa para sitios con suelos pobres o climas cálidos es plantar esquejes grandes, ya que altas tasas de supervivencia y de crecimiento pueden lograrse cuando se utilizan estos tamaños (Rossi, 1999). Esto es especialmente importante en sitios secos, porque los esquejes grandes pueden acceder al suelo húmedo. El potencial de supervivencia también puede incrementarse si a las plantas se les da mantenimiento durante el primer año después de la plantación, incluyendo riego, control de malezas y protección contra herbívoros.

F. Colecta y propagación de esquejes/estacas. Los materiales vegetativos se colectan de los tallos, raíces u otras partes de plantas donantes. Pueden ser directamente plantados en el sitio del proyecto o enviados a un vivero para enraizar los esquejes. El potencial para producir raíces de esquejes varía dependiendo de la especie, puede ser desde muy fácil a extremadamente difícil. Las especies que más fácilmente se propagan de forma vegetativa por esquejes son los ar-

bustos de ecosistemas riparios y algunos árboles y cactáceas. Algunas especies deciduas que crecen bien en ambientes riparios, como los sauces (*Salix spp.*) y álamos (*Populus spp.*), tienen una tasa alta de éxito, cuando se propagan por esquejes. Sin embargo, muchas especies de árboles y arbustos sólo enraízan bajo condiciones ambientales con técnicas de propagación especializadas.

Figura 41
Esquejes colectados.



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

El proceso de obtención de esquejes es relativamente sencillo, pero el éxito depende de varios factores. La capacidad de una estaca para formar un sistema radical o caulinar adventicio depende de factores endógenos, es decir propios del material y de factores exógenos (ambiente). La capacidad genética de las plantas progenitoras para producir raíces adventicias determinará los cuidados necesarios para que los esquejes enraícen. Además, la condición de los progenitores influye en la calidad del esqueje enraizado. El material procedente de plantas jóvenes, especialmente cuando se encuentran en plena etapa de crecimiento, tiene más probabilidades de enraizar.

Un aspecto por considerar es la conveniencia de regar las plantas progenitoras unas pocas horas antes, de tal forma que el tejido esté turgente, en especial si se van a realizar esquejes foliares. La higiene también resulta esencial si se desea evitar el riesgo de enfermedades en un esqueje al realizar un corte o manipularlo, por lo que es necesario mantener limpias las superficies y el material. Las herramientas para obtener esquejes deben esterilizarse y mantenerse lo más afiladas posible, con el fin de evitar

causar daño en las células durante la operación. Otro aspecto relevante es el clima; en climas templados es posible enraizar esquejes de muchas plantas directamente en el exterior, en una tierra y a la sombra, durante la mayor parte del año.

Algunos ejemplos de propagación de esquejes son los herbáceos, de raíz y hoja. En los esquejes herbáceos se emplean tallos tiernos, sin endurecer, del año, el cual solamente es adecuado para especies de fácil propagación. En los esquejes de raíz se utilizan fragmentos de la raíz, los cuales una vez plantados, son capaces de regenerar totalmente la parte aérea. Es un sistema muy eficiente para propagar plantas que se extienden por rizomas. La propagación de esquejes de hoja se realiza solo en plantas cuyas hojas almacenen suficientes sustancias de reserva como para poder generar raíces, como algunas crasuláceas.

La propagación vegetativa se realiza por medio de la plantación de esquejes de 10 a 15 cm de longitud y de 5 a 7 mm de diámetro, preferentemente con una hoja y que sean de la brotación del año para que posea características de juventud y así facilitar su enraizamiento adventicio, o se corta media lámina foliar para evitar el exceso de transpiración.

El enraizamiento mejora con la aplicación de hormonas de enraizamiento que se aplican únicamente en la superficie del corte. En este proceso regenerativo las raíces desarrolladas a partir de un fragmento de tallo, hoja o tejido de yema se denominan raíces adventicias. Para lograr esto, un grupo de células en desarrollo (meristemos), normalmente cercanas al del tejido vascular (que transporta la savia), se diferencian en una serie de raíces iniciales (células radicales), que formarán yemas radicales y posteriormente raíces adventicias. También reciben el nombre de raíces “inducidas” o de “herida” porque, en la mayoría de los casos, sólo se dan si la planta ha resultado dañada en algún punto, por ejemplo, si ha recibido un corte en el tallo. En las plantas herbáceas, las raíces adventicias se originan justamente afuera y entre los haces vasculares. En las plantas leñosas perennes, en las cuales hay una capa o más de floema y xilema secundario joven, las raíces adventicias de estacas de tallos se originan generalmente en el tejido de la xilema secundario joven.

Los esquejes procedentes de plantas de hoja perenne se realizan dejándoles algunas hojas en el extremo. Los esquejes y estacas de madera suave proceden del crecimiento en primavera y suelen enraizar con facilidad, pero también requieren mayores cuidados tales como calor de fondo y nebulizaciones de agua para mantener alta la humedad ambiental. Temperaturas de 23 a 27°C en la base y 18 a 21°C en la parte aérea, unido al uso de reguladores de crecimiento y a humedad alta, pueden hacer enraizar los esquejes en 15 a 30 días, dependiendo de la especie (Hartmann, 1997).

Es relevante colectar los esquejes cuando las plantas no estén en latencia, ya que las yemas deben estar activas.

El tiempo que tarda un esqueje en enraizar depende de la especie, del tipo de esqueje, de la edad del tallo, de la forma en la que se preparó y de las condiciones de humedad y temperatura. En general, los esquejes foliares enraízan en unas tres semanas, mientras que los leñosos y semileñosos tardan hasta cinco meses.

En esquejes de plantas leñosas que son difíciles de enraizar se deberá poner atención al tejido calloso, puesto que parece ser que de ahí existe la mayor cantidad de células para formar raíces. La formación de callo puede verse favorecida con la aplicación de substancias promotoras de enraizamiento como las auxinas sintéticas: ácido indolbutírico (AIB) y el ácido naftalen acético (ANA), tanto para gimnospermas como para

angiospermas (Hartmann, 1997). El objetivo de tratar los esquejes y las estacas con reguladores de crecimiento del tipo auxina, es aumentar el porcentaje de enraizamiento en los esquejes, acelerar la formación de éstas, aumentar el número y la calidad de las raíces formadas en cada estaca y uniformar el proceso de enraizamiento.

Los materiales químicos sintéticos de mejor resultado para estimular la producción de raíces adventicias son los ácidos indolbutírico y naftalen acético, debido a que no son tóxicos y en una amplia gama de concentraciones y son eficaces para estimular el enraizamiento en un gran número de especies de plantas. Las especies leñosas, difíciles de enraizar se deben tratar con las preparaciones más concentradas, mientras que en las especies herbáceas y suculentas de fácil enraizamiento se deben hacer cortes frescos poco antes de sumergirlas en el polvo o líquido hormonal. El polvo que se adhiere a los esquejes después de haberlas sacudido ligeramente es suficiente para producir el efecto deseado, así como el remojo en soluciones diluidas de los 2 a 3 cm basales de los esquejes. Deben insertarse en el medio de enraizamiento inmediatamente después de aplicar el tratamiento (Hartmann, 1997).

Los esquejes enraizados deben extraerse con cuidado empleando una pala de jardinería o una herramienta similar, cuidando de no romper las raíces. Es conveniente extraer las estacas con un poco del medio adherido a las raíces, es mejor el enraizado en bolsas o contenedores individuales para obtener un cepellón. El medio de enraizamiento o Tecnosol puede estar conformado con suelo orgánico proveniente del trazo del camino, mezclado con composta, biocarbón o agrolita. Si las estacas se colocan en almácigos para enraizarlos, las raíces de las estacas deberán tener 3 a 5 cm de largo para trasplantarlas a bolsas. Una vez hecho el trasplante deben regarse en abundancia y sin demora. Deben protegerse de la radiación solar con una malla sombra.

A modo de resumen, el procedimiento de obtención de esquejes es:

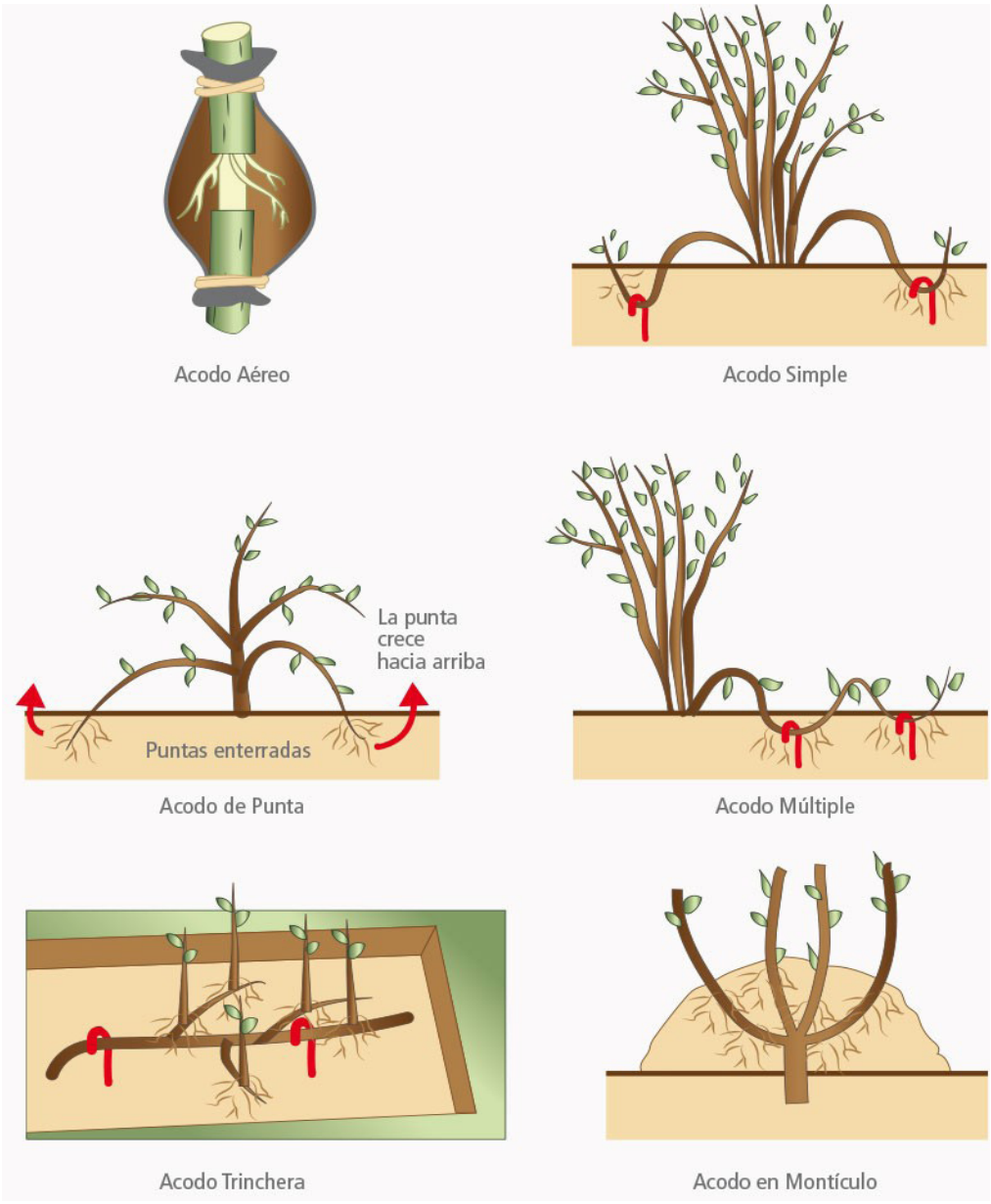
- Desinfectar las manos y herramientas para evitar que los esquejes se contaminen con hongos o bacterias. En una cubeta preparar cloro al 1%, esto es 10 ml de cloro (cloro comercial) por cada litro de agua.
- Hidratar el Tecnosol y vaciarlo en charolas de polietileno de 50 cavidades. Puede hidratarse con un químico enraizador comercialmente disponible para favorecer el trasplante.
- Cortar esquejes de 15 a 20 cm de la planta a elegir (deben llevar al menos dos nudos con una hoja).
- Impregnar con hormonas de enraizamiento comercialmente disponible.
- Plantar los esquejes inmediatamente para que no se deshidraten, introduciendo el tercio inferior en el Tecnosol y apretar con los dedos para evitar que quede aire. Es muy importante mantener la polaridad del esqueje, es decir, clavar el esqueje por el extremo inferior y no superior.
- Colocar en un invernadero con temperatura alrededor de 20 a 24°C aproximadamente y que no reciban los rayos de sol directamente, ni corrientes de aire. El riego se debe hacer cada tercer día, preferentemente por aspersión.
- Al cabo de seis semanas aproximadamente, el esqueje desarrollará raíces por su base y se tendrá una planta nueva.
- Se recomienda hacer el trasplante a macetas individuales (18 cm de diámetro aproximadamente) y aplicar riego abundante para evitar estrés hídrico.

3.2.3.4 Propagación de plantas nativas por acodo

El acodo es un método de propagación en el cual se provoca la formación de raíces adventicias a un tallo que está todavía unido a la planta madre. Luego el tallo enraizado se separa para convertirlo en una nueva planta que crece con sus propias raíces. La rama acodada sigue recibiendo agua y minerales debido a que no se corta el tallo y la xilema permanece intacta. La formación de raíces en los acodos depende de la provisión continua de humedad, buena aireación y temperaturas moderadas en la zona de enraizamiento.

A continuación, se presenta un ejemplo de la forma en cómo se debe hacer la propagación de plantas por acodo.

Figura 42
Propagación por acodo.



Fuente: https://www.agrosintesis.com/metodos-de-propagacion-vegetativa/

3.2.3.5 Otras estructuras vegetales empleadas en la propagación

A. Tubérculo. En algunas especies la propagación es más fácil, más rápida y económica por medios vegetativos que por semillas. El tubérculo es una raíz o un tallo subterráneo que posee gran cantidad de tejido de reserva (parénquima) y un fino tejido suberoso. Pasado un tiempo y bajo las condiciones adecuadas, se pueden originar nuevas plantas (Hartmann, 1997; Adkis y Miller. 2008).

Existen distintos tipos de tubérculos:

- Tubérculos de raíz. Son partes abultadas de las raíces de algunas plantas, incapaces de formar yemas adventicias excepto en la corona. Cuando las yemas han producido vástagos y han agotado las reservas, los tubérculos mueren, pero durante el periodo de desarrollo se forman otros nuevos (*Dahlia* sp). La planta puede multiplicarse si se arranca una sección de la corona que tenga yema.
- Tubérculos de tallo: Son tallos modificados, con las mismas funciones y ciclo vital que los tubérculos de raíz, pero con mayor número de yemas sobre gran parte de su superficie. Muchos tubérculos pueden provenir de una sola planta, como en el caso de la papa (*Solanum tuberosum*).

B. Estolón. En botánica, el estolón es un brote lateral, normalmente delgado, que nace en la base del tallo de algunas plantas herbáceas y que crece horizontalmente con respecto al nivel del suelo, de manera epígea o subterránea. Tienen entrenudos largos y cortos alternados que generan raíces adventicias. Son muy conocidos los estolones de los pastos. La separación de estos segmentos enraizados da lugar a plantas hijas, que es la rama lateral de crecimiento horizontal, con nudos que forman raíces en la parte ventral y hojas en el dorso, se cortan de tramo donde aparecen las raíces, se eliminan las hojas y se siembran.

C. Cormo. Son estructuras de origen caulinar (tallo) que se forman a partir de la base subterránea del tallo y desarrollan una especie de escamas de textura parecida al papel, así como yemas de las cuales una o dos alcanzan la superficie. Son ejemplos de cormos las especies del género *Milla* (estrella mexicana). El cormo se renueva cada año, alrededor del cormo parental pueden formarse cormos diminutos, llamados “cormelos” que pueden emplearse como medio de propagación.

D. Bulbo. Los bulbos, al igual que los rizomas, cormos y tubérculos, son órganos subterráneos de almacenamiento de nutrientes. Los bulbos se clasifican en dos tipos tunicados, en los que sus bases están rodeadas por capas superpuestas y escamosos en los que dichas bases están imbricadas (como las tejas de un tejado) y son más carnosas. El bulbo imbricado no tiene la túnica que protege las escamas carnosas. Algunas especies con bulbos incluyen a los mayitos (*Zephyrantes* sp.), y a la pata de gallo (*Sprekelia formosissima*). Es posible dividir un bulbo en fragmentos, en láminas (laminado) o en pares de escamas, cada una con una parte de la lámina basal. Si las condiciones son adecuadas, es posible provocar el desarrollo de bulbitos sobre las láminas basales, a partir de las láminas o los pares de escamas. Al arrancar un bulbo escamoso del suelo, las escamas desprendidas, sí se dejan en el suelo, formarán una nueva planta.

3.2.3.6 Prácticas recomendadas para el cuidado de plantas en vivero

Una vez realizado el rescate de plantas, semillas o esquejes, los individuos serán llevados al vivero rústico en donde se les dará cuidado y mantenimiento acorde a las necesidades de cada especie o individuo. Cuando se trate de ejemplares como esquejes o plantas con raíz desnuda, una vez ingresadas al vivero se evaluará su estado físico, verificando si no traen heridas o afectaciones en su sistema radicular, de ser el caso, se les realizará inmediatamente curación y se les aplicará un enraizador para que en menor tiempo se empiecen a adaptar a las nuevas condiciones del sitio. Posteriormente se iniciará con las actividades que se describen a continuación.

A. Trasplante a bolsas de polietileno.

La recomendación de emplear bolsas de polietileno con fuelle se debe a las ventajas que se obtienen al utilizar este tipo de envases: impiden el contacto directo con el suelo del vivero, haciendo que el combate a plagas sea más sencillo; la raíz se mantiene intacta disminuyendo el estrés al momento de llevar a cabo el trasplante en campo y facilitan el riego y la aplicación de fertilizantes promoviendo el crecimiento homogéneo de la producción. El tamaño de las bolsas se establece con base en el tamaño establecido para la plantación.

Las plantas rescatadas, y las propagadas en vivero a partir de semillas y esquejes se pueden trasplantar a bolsas de polietileno con fuelle. En el caso de las plantas propagadas en vivero, un tamaño de bolsas de 18 x 30 cm, es lo suficientemente grande para evitar malformaciones en las raíces y permitirá mantener las plántulas en el vivero hasta el momento de ser trasplantadas al campo (aproximadamente 100 cm de altura). En el caso de las plantas rescatadas, el tamaño de las bolsas dependerá del tamaño de las plantas que se extraigan. Se pueden conseguir bolsas ya perforadas, sin embargo, si las bolsas fueran cerradas deberán hacerse perforaciones en su base y paredes con el fin de lograr un drenaje adecuado. Las perforaciones pueden hacerse por medio de perforadoras que permitan hacer varias perforaciones a la vez.

Cuando las semillas han germinado y las plántulas han alcanzado unos cuantos cm, puede llevarse a cabo el trasplante a bolsas de polietileno. En el caso de los esquejes, pueden enraizarse en almácigos y posteriormente trasplantarse o desde un principio enraizarse en las bolsas de polietileno. Todas las plantas deben estar protegidas con una malla sombra (80%) y deben ordenarse por especie en las diferentes platabandas. La función de las platabandas es proteger a las plántulas de los excesos de agua por lluvia, insolación y viento.

Antes de introducir las raíces a las bolsas se les coloca una capa de 4 cm de sustrato en la base para asegurar un relleno completo del envase. Las plantas se colocan dentro de la bolsa, tratando de no dañar las raíces. Los espacios vacíos que queden entre el cepellón y el límite de la bolsa serán rellenados con la tierra previamente preparada. Ésta deberá estar lo suficientemente húmeda (capacidad de campo) para evitar que se formen bolsas de aire. Conforme las bolsas se van llenando se golpean ligeramente en su base contra el piso y se aprieta la tierra con las manos para obtener una compactación adecuada. La compactación excesiva de la tierra impide el crecimiento adecuado de las raíces por lo que deberá evitarse. Se dejará un espacio de 3 a 4 cm en la parte superior de la bolsa, para permitir la acumulación momentánea de agua cuando las plántulas se rieguen en el vivero.

B. Utilización del Tecnosol en el llenado de bolsas.

Se recomienda utilizar el horizonte orgánico superficial (horizonte A) del suelo que se localiza en el derecho de vía, el cual se puede mezclar con composta producidas con materiales del desmonte o biocarbón producido con la madera de las ramas y troncos cortados. El biocarbón se produce por pirolisis (ausencia de oxígeno) de una manera muy sencilla. Para que el biocarbón funcione adecuadamente, debe inocularse con composta dos meses antes de emplearse en el Tecnosol. El suelo orgánico proveniente de la capa superficial del suelo (tierra obscura) se acumula en un montículo para posteriormente ser empleada en el llenado de bolsas.

En la siguiente Figura se muestra el llenado de bolsas con el sustrato que será utilizado para el crecimiento de las plantas germinadas o rescatadas.

Figura 43
Preparación de Tecnosol para el llenado de bolsas y trasplante.





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

Algunas de las características que debe tener el suelo orgánico que se utilice en el trasplante son las siguientes.

- Su textura debe ser franca para impedir la compactación del suelo.
- Presentar una buena capacidad de retención de agua disponible.
- Debe ser lo suficientemente poroso para permitir un drenado adecuado del agua.
- No debe presentar niveles excesivos de salinidad y su pH debe fluctuar alrededor de 6.
- Presentar una densidad aparente menor a 9 g/cm^3.
- Contener una cantidad importante de materia orgánica.
- Alta capacidad para intercambiar cationes.
- Una ventaja de emplear el mismo suelo de la región es que se posee micorrizas y bacterias nativas.

C. Defoliación de las plantas rescatadas.

Algunas especies que poseen hojas anchas y delgadas (latifoliada) tienen una tasa de evapotranspiración alta. Esta característica genera una rápida deshidratación de los tallos. La defoliación de los tallos es una práctica común que se utiliza para disminuir la transpiración en las plantas. La defoliación debe realizarse con tijeras para podar, evitando el maltrato sobre todo en los ápices del tallo.

D. Riego.

El contenido de agua en las plantas es fundamental para asegurar su crecimiento y salud. El contenido de agua en las plantas se encuentra en constante cambio durante el día y el periodo de crecimiento. Cuando la pérdida de agua por transpiración a través de las hojas excede la tasa de absorción de este elemento a través de las raíces, se crea una situación de estrés hídrico que afecta su crecimiento. El agua es esencial para procesos como la fotosíntesis, transporte de nutrimentos y desarrollo celular. Entre el 80 a 90% del peso de las plantas es agua. La falta de riego puede causar daño e incluso la muerte de las plantas en cualquier estado de desarrollo; las plantas están contenidas en una bolsa, por lo que las raíces son completamente dependientes del agua que reciben mediante el riego. El agua debe tener una conductividad baja (menor a 1500 µS/cm) y un pH alrededor de 6. El vivero debe contar con agua todo el año, particularmente en la época de secas, cuando las plantas requieren más agua.

E. Nutrición.

Las plantas requieren cantidades adecuadas de nutrientes en un balance apropiado para realizar sus procesos fisiológicos básicos, como la fotosíntesis, y promover el rápido crecimiento y desarrollo. Una nutrición adecuada puede acelerar de tres a cinco veces el crecimiento de las plantas, en comparación con plantas no fertilizadas.

Figura 44
Fertilización de ejemplares en vivero.



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

Los tres nutrientes más importantes para el crecimiento de las plantas son el nitrógeno, el fósforo y el potasio.

- **Nitrógeno.** A pesar de que el 78% de la atmósfera terrestre está constituida por nitrógeno en forma gaseosa, frecuentemente limita el crecimiento de las plantas. El nitrógeno es absorbido en forma de NH_4^+ y NO_3^-. El nitrógeno se encuentra en todas las proteínas, y el nitrógeno y el magnesio son componentes estructurales de la clorofila, necesaria para la fotosíntesis.
- **Fósforo.** El fósforo en las plantas se encuentra en una proporción que va de 0.1 a 0.5%, y es absorbido en forma de $H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-}. La función del fósforo en las plantas es el almacenamiento y la transferencia de energía, en donde el ATP es convertido en ADP (fosforilación). El fósforo es un componente estructural de los ácidos nucleicos, coenzimas, nucleótidos, fosfoproteínas, fosfolípidos y azúcares fosfatadas. Una gran cantidad de fósforo se encuentra en semillas y frutos por lo que se considera esencial para su formación. Además, está asociado al aumento en el crecimiento de las raíces (Marschner, 2012).

- **Potasio.** El potasio es absorbido por las plantas en forma de K+. A diferencia de otros nutrimentos no forma compuestos, por lo que su principal función está relacionada con la fuerza iónica de las soluciones. Otras funciones del potasio son: activar enzimas involucradas en procesos fisiológicos, bombear agua hacia el interior de las raíces e interviene en la formación de ATP (Marschner, 2012; Havlin *et al.*, 1999). Después del nitrógeno, el potasio es el nutrimento que más absorben las plantas.

Algunas especies nativas requieren una fertilización mínima, sin embargo, otras requieren aplicaciones importantes de nitrógeno y otros nutrientes para obtener buenas tasas de crecimiento. No se debe esperar a que aparezcan deficiencias nutrimentales en las hojas para aplicar fertilizantes.

En la siguiente Tabla se presenta un ejemplo de las concentraciones recomendadas para la fertilización de las plantas de acuerdo con su estado de crecimiento.

Tabla 33
Ejemplos de regímenes de fertilización para las fases de crecimiento de las plantas en vivero.

Fase de crecimiento	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
Establecimiento	Medio	Alto	Bajo
Rápido crecimiento	Alto	Medio	Medio
Endurecimiento	Bajo	Bajo	Alto

F. Identificación de plagas y enfermedades.

Una enfermedad se presenta cuando son afectadas las condiciones fisiológicas y morfológicas normales de una planta. Una plaga se define como cualquier factor estresante biótico que cause una enfermedad. Cuando la enfermedad es provocada por microrganismos como hongos, bacterias y virus se emplea el término patógeno. Por otra parte, el término síntoma se emplea para describir la respuesta morfológica y fisiológica de la planta hospedera al factor estresante. Algunos síntomas son evidentes como la clorosis foliar o la disminución del crecimiento (Landis, 1993).

Es muy importante mantener a las plagas fuera del vivero, así que debe tomarse en cuenta la prevención de enfermedades, excluyendo las plagas del área de crecimiento. Todas las enfermedades son más fáciles de prevenir que curar, y la sanitización comienza con la selección y limpieza del sitio. Toda la vegetación innecesaria debe ser removida porque proporciona protección a roedores y aves y pueden hospedar plagas de insectos, como trips, áfidos, grillos y moscas. Las plagas potenciales acceden al área de crecimiento a través del viento, agua, contenedores, materiales de propagación y algunas plagas llegan directamente. Un aspecto relevante en el control de plagas es la salud de las plantas, que las hace más resistentes a la infección de hongos y ataque de insectos. La resistencia a las plagas puede ser atribuido a características físicas como la cutícula del follaje y las defensas químicas. Una de las causas más importantes que favorece la aparición de plagas es el riego. El exceso de riego ocasiona la pudrición de las raíces relacionada con enfermedades fúngicas.

Figura 45
Fumigación para el control de plagas o enfermedades.



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

El crecimiento óptimo de las especies arbóreas que se encuentran en el vivero puede lograrse evitando la aparición de agentes estresantes. Existen factores bióticos y abióticos que ocasionan estrés. Entre los abióticos se encuentran las deficiencias minerales, las heladas, el daño mecánico y el daño químico. Muchos agentes estresantes biológicos pueden causar enfermedades como es el caso de hongos, bacterias, virus, animales y hierbas, las cuales pueden afectar el crecimiento debido a que compiten por agua, minerales o luz (Landis, 1993).

Algunos aspectos técnicos que se recomienda utilizar para la diagnosis de enfermedades en plantas son:

- Revisar las partes de la planta para detectar síntomas y determinar las partes afectadas.
- Determinar si todas las especies en el vivero son igualmente afectadas o no.
- Establecer el patrón de la enfermedad en el área de crecimiento (platabandas).
- Revisar varias plantas con los mismos síntomas.
- Considerar la posibilidad de que el daño sea ocasionado por enfermedades abióticas.
- Establecer la historia de la enfermedad.

Para llevar a cabo el control de plagas y enfermedades es necesario conocer el diagnóstico preciso del tipo de plaga que esté afectando el crecimiento de la planta, y de acuerdo con éste describir el tratamiento más adecuado. Es bien sabido que muchos plaguicidas tienen efectos colaterales para la salud del ser humano y para el ambiente, por lo que debe tenerse mucho cuidado con su uso. Si se requiere usar plaguicidas, es necesario tomar en consideración que son altamente tóxicos y no deben utilizarse indiscriminadamente (Landis, 1993).

A continuación se describen algunos organismos que en la bibliografía se mencionan como huéspedes de algunas especies arbóreas.

INSECTOS

Existe una gran cantidad de insectos que pueden ser perjudiciales para el desarrollo de los árboles, afectando brotes, yemas, raíces, hojas y tallos. De acuerdo con la estructura del hospedero que infestan se les denomina defoliadores, chupadores de savia e insectos de la raíz.

Defoliadores. Comprenden desde individuos adultos hasta larvas. Muchas especies de insectos pequeños se alimentan de las partes más suaves de las hojas y sólo dejan las venas o las partes más duras, y por lo tanto se les denomina esqueletonizadores. Algunas especies se alimentan entre la superficie inferior y superior de la hoja, a éstos se les conoce como minadores. Los defoliadores más importantes son las larvas de mariposas (Lepidoptera: Arctiidae, Geometridae, Lasiocampidae, Saturniidae, Nynphalidae y Pieridae) y las avispas (Hymenoptera: Diprionidae y Formicidae). Los dipriónidos, avispas conocidas como moscas sierra, son importantes defoliadores de pinos. Algunos saltamontes (Orthoptera: Acrididae y Tettigonidae), escarabajos (Coleoptera: Chysomelidae, Curculionidae, Scarabaeidae) y moscas (Diptera: familia Cecidomyiidae), son defoliadores de regular importancia (Rodríguez 1990, Cibrián *et al*. 1995). Los árboles de hojas perennes son más fuertemente afectados por las defoliaciones que los caducifolios.

A continuación se presentan las características principales de distintos tipos de insectos considerados plagas:

Malacosoma incurvum (Lepidoptera)

Hospedero: *Prunus* spp.

Es una palomilla con una expansión alar de 23 a 45 mm. El color del cuerpo y de las alas es café sepia. Las antenas son bipectinadas. El huevo es cilíndrico,

de 1 mm de largo. Los huevos están en grupos de 100 a 300 individuos, cubiertos con espuma. La larva es de color negro cubierta con setas de color amarillo anaranjado. Las larvas forman una bolsa de seda entre las ramas que es fácilmente detectable.

Se presenta una generación por año. Los adultos emergen de marzo a mayo. Las oviposturas se colocan en las ramas delgadas. El desarrollo embrionario dura de 60 a 75 días y las larvas emergen a mediados de enero. Su alimentación consiste en hojas, las cuales consumen durante el día y algunas veces en la noche. Las poblaciones de esta especie disminuyen al aplicar insecticidas biológicos a base de *Bacilius thuringiensis*.

***Eutachyptera psidii* (Lepidoptera)**

Hospedero: *Pinus patula*, *Quercus* spp.

Palomillas de 42 a 85 mm de expansión alar, con el cuerpo y la parte media basal de las alas de color café oscuro; la parte media distal de ambos pares de alas de tonalidad café grisáceo clara y casi transparente. Las antenas son bipectinadas. Los huevos son esféricos de 1.4 mm de consistencia coriácea y de color que varía de rojo a amarillento rojizo. Las larvas maduras tienen una longitud de 65 mm, la cabeza y el cuerpo son de color café muy oscuro y todo el cuerpo contiene setas de color café o amarillo oro que son urticantes para la piel de humanos. Las larvas forman una bolsa de seda en la que permanece hasta pupar.

Se presenta una generación por año. Los adultos están presentes durante junio, julio y agosto. Las hembras ovopositan en ramas y las larvas emergen en julio y agosto. Las larvas forman una bolsa de seda que dejan por las noches para alimentarse. Las larvas secretan seda sobre las ramas de manera que forman senderos. La remoción manual de las bolsas de seda con larvas y su posterior incineración es la forma de combate más frecuentemente usada.

***Preptos hidalgoensis* (Lepidoptera)**

Hopedero: *Pinus patula*, *Quercus* spp.

El adulto tiene una expansión alar de 27 mm Las alas anteriores son de color pardo oscuro. El tórax presenta un color pardo oscuro en la región anterior y pardo claro en la posterior. El macho tiene antenas plumosas de color pardo. Los huevos son esféricos de color verde claro y miden 10 mm de diámetro. Las larvas desarrolladas miden de 50 a 60 mm de longitud, con la cabeza negra y el cuerpo con coloraciones vistosas, dorsalmente presenta setas a manera de pinceles, ventralmente el cuerpo es negro con extremidades color rojo.

Presenta una generación al año. Los huevecillos son depositados en la corteza y el envés de las hojas. Las larvas pequeñas se alimentan de las hojas de encino y después del follaje de pino; cuando están bien desarrolladas se dejan caer al suelo, se entierran en la hojarasca y hacen un capullo. La larva está presente desde mediados de julio a diciembre.

Hyphantria cunea (Lepidoptera)

Hospedero: *Acer* spp, *Prunus* spp y *Liquidambar styraciflua*.

Palomilla de 11 a 15 mm con una longitud de alas de 30 a 42 mm. En los machos las antenas son pectinadas y en las hembras plumosas. Las alas son blancas, pero en algunas ocasiones se presenta un moteado negro en la superficie dorsal. Los huevos son ovales. Las larvas se presentan en dos formas, la larva de cabeza negra con un cuerpo de coloración verdosa, con una franja ancha y oscura en el dorso. El cuerpo está cubierto por setas de color blanco. La forma de cabeza roja es bronceada a amarillenta con tubérculos anaranjados a rojizos, pelillos cafés y una cápsula cefálica del mismo tono.

Dependiendo de la localidad y la altitud presentan de una a cuatro generaciones por año, frecuentemente dos. Al final de la primavera emergen los adultos que permanecieron como pupas durante el invierno. De mayo a julio las hembras ovopositan en el envés de las hojas y forman una bolsa de seda. Para el combate se emplean insecticidas a base de *Bacillius thuringiensis*, y se debe aplicar al follaje cuando las larvas son jóvenes.

Evita hyalinaria blandaria (Lepidoptera)

Hospedero: *Pinus* spp, *Prunus* spp y *Quercus* spp.

Palomillas de consistencia frágil con una extensión alar de 26 a 31 mm. El cuerpo y las patas están cubiertos por escamas de color blanquecino amarillento. Los machos presentan antenas bipectinadas de tonos más oscuros que el cuerpo, en las hembras las antenas son filiformes. Las alas son de color blanco aperlado amarillento y parcialmente transparentes. La larva es un gusano medidor (con un par de patas falsas en los segmentos abdominales sexto y décimo. La cabeza es café claro con puntuaciones oscuras. El cuerpo es más delgado que la cabeza de color café pálido a grisáceo y presenta dos bandas longitudinales subdorsales de color café a gris oscuro. Los huevos con forma de barril se disponen a lo largo de las hojas de su hospedero, miden menos de 1 mm de diámetro.

Se presenta una generación al año. La emergencia de adultos se presenta durante el mes de mayo. Las mariposas son diurnas. Las hembras ovopositan en el follaje. Las larvas se encuentran a partir de julio. En invierno las larvas permanecen en reposo y en la primavera reinician su alimentación. En abril se alimentan vorazmente del follaje. Sus poblaciones se han controlado con *Bacillius thuringiensis*.

Rothschildia orizaba (Lepidoptera)

Hospedero: *Erythrina coralloides* y *Erythrina americana*.

Palomillas de gran tamaño que alcanzan hasta los 12 cm de expansión alar. Con antenas bipectinadas o plumosas, de color pajizo amarillento. El tórax y

el abdomen son cafés y en las partes anteriores de ambas estructuras se encuentran bandas de setas blanco-amarillentas. Los dos pares de alas tienen un patrón de manchas simétricos de colores cafés y rosas. en la parte media de cada ala se encuentran áreas triangulares transparentes, a las que se les llama espejos y por eso recibe el nombre común de cuatro espejos. Los huevos son ovales amarillentos al madurar. Las larvas son negras, con *scoli* amarillos en cada segmento del cuerpo, al madurar alcanzan una longitud de 6 cm. Las setas son urticantes para el ser humano.

Se presenta una generación anual. Los adultos emergen en el verano. Tanto las hembras como los machos son de vuelo nocturno o crepuscular. Las hembras ovopositan en el envés de las hojas del hospedante. Las larvas jóvenes se alimentan de las hojas recién formadas. Durante el invierno las larvas se transforman en pupas. El control es a base de insecticidas de contacto.

***Neodiprion omosus* (Hymenoptera)**

Hospedero: *Pinus patula*.

Avispas que miden de 5.8 a 7.5 mm de longitud con una expansión alar de 15 mm. El cuerpo es negro con excepción de la parte superior de las tibias que son claras. Las hembras poseen antenas aserradas de 19 segmentos, en los machos las antenas son bipectinadas. Los huevos son cilíndricos de 1 mm de longitud y 0.4 mm de ancho, de color verde amarillento. La cabeza es de color negro y el cuerpo verde oscuro grisáceo, con tres bandas longitudinales negras en la región dorsal y lateral. Las larvas bien desarrolladas miden de 22 a 28 mm de longitud.

Se presenta una generación por año. Los adultos vuelan y ovopositan de mediados de agosto a principios de octubre, las larvas se alimentan de septiembre a enero del siguiente año. La emergencia de los adultos generalmente se presenta por las mañanas. La cópula se presenta pocas horas después de haber emergido los adultos. La ovoposición se efectúa al día siguiente de la copula. La hembra se apoya fuertemente en la hoja y con la lanceta de su ovopositor inserta sus huevecillos en el borde exterior de la hoja. Después de ovopositar, las hembras permanecen en las hojas protegiendo a sus huevecillos de parásitos. Las larvas comienzan a alimentarse del tejido parenquimatoso de las acículas y presentan hábitos gregarios. Los insecticidas de contacto matan fácilmente a estas larvas.

Insectos chupadores de savia. Los insectos chupadores causan daño debido a que se alimentan de la savia. En la mayoría de los casos el insecto introduce su aparato bucal directamente dentro de los tejidos del árbol y después succiona la savia. Las chinches (Hemiptera: Miridae, Tingidae y Pyrrhocoridae) son activos y se mueven sobre el árbol para alimentarse. Sin embargo, las ninfas y los adultos de algunos homópteros como las escamas y piojos harinosos (Adelgidae, Margarodidae, Diaspididae, Coccidae, Pseudococcidae y Kermesidae) permanecen inmóviles toda su vida. Otras especies

son móviles (Cicadellidae, Cercopidae, Membracidae, Psyllidae, Aleyrodidae y Aphidae). Algunos ácaros (Eriophyidae y Tetranychidae) se alimentan sobre el follaje. Los insectos chupadores causan amarillamiento del follaje y en casos extremos la muerte. Muchas especies son vectores importantes de enfermedades virales.

***Stenomacra marginella* (Hemiptera)**

Hospedero: *Buddleia* spp., *Erythrina* spp. y *Persea americana*.

Chinches de 12 a 15 mm de longitud. El cuerpo es oscuro, aunque la parte posterior del protórax puede ser anaranjada o negra. La mitad posterior del protórax y los márgenes de los hemiélitros tienen líneas anaranjadas. El abdomen en su parte ventral anterior y en el dorso es anaranjado o rojizo. Las patas son negras con excepción de las coxas y la parte anterior de los fémures que son anaranjadas. Los huevos tienen forma de barril y son de color rojizo a anaranjado.

Se presenta una generación por año. Los adultos están presentes desde finales del invierno hasta mediados del verano. Son activos durante el día y se mueven de un árbol a otro. La ovoposición se realiza en el mes de mayo hasta julio. Los huevecillos son depositados en diferentes lugares incluso estructuras no vegetales como bardas. Las larvas emergen durante junio y julio, casi siempre están agregadas y protegidas por los adultos. Las ninfas y los adultos son fitófagos y se alimentan de la savia de hojas. No son selectivos en sus hospederos. Se trata de insectos chupadores que raramente causan la muerte del hospedero pero que provocan debilitamiento. Para su control se recomienda cualquier insecticida de contacto que se aplica cuando las ninfas estén agregadas.

***Hoplophorion* (Homoptera)**

Hospedero: *Persea americana*.

Chinches que miden de 10 a 12 mm de longitud. La forma del cuerpo es ancha y alta en la parte anterior y angosta hacia la posterior, con dos elevaciones como quillas en la parte anterior y dorsal. La coloración es rojo anaranjado en cabeza y pronoto. Las alas son membranosas. Se les conoce comúnmente como periquillos del aguacate. Las ninfas son de color gris.

Se presenta una generación por año. A finales de verano las hembras ovopositan incrustando los huevecillos bajo la corteza de las ramas. En la primavera emergen las ninfas, que se alimentan succionando la savia de ramas, también pueden dejarse caer al suelo alimentándose de pastos hasta alcanzar el estado adulto. Los nuevos adultos vuelan hacia los árboles donde se alimentan, aparean y ovopositan. Este insecto se controla con insecticidas sistémicos aplicados al follaje.

Eriosoma lanigerum (Homoptera)

Hospedero: *Crataegus* spp.

Las hembras partenogénicas son ápteras, cuerpo piriforme, robusto de color marrón pálido, cubierto con cera que puede estar a manera de hilos, la cera se acumula en la parte posterior del cuerpo. Cuando maduran alcanzan hasta 3 mm de longitud. Las ninfas recién nacidas son de color crema pálido. Los adultos alados tienen el tórax más oscuro, su aparato bucal está atrofiado, sobre el dorso del cuerpo existen abundantes glándulas productoras de cera.

Pasan el invierno en estado de huevo o como hembras ápteras que viven en la raíz del hospedero. Las hembras que nacen de huevo son las fundadoras, ellas carecen de alas, todas ellas son vivíparas. Después de la tercera generación puede haber hembras aladas, capaces de volar y cambiar de hospedero. Se logran resultados aceptables para su control con el parasitoide *Aphelinus mali*. Las infestaciones también pueden controlarse con insecticidas sistémicos o de contacto que estén mezclados con aceites minerales ligeros.

Insectos que se alimentan de la raíz. Algunos miembros de la familia Scarabaeidae y Scolytidae del orden Coleoptera (escarabajos) se alimentan de raíces de árboles. Las larvas de Scarabaeidae son conocidas como gallinas ciegas y pueden ser un problema en los viveros forestales. Una especie de escolítido deposita sus huevos en la base de la raíz de árboles jóvenes. Las larvas se alimentan del floema del tallo y de las raíces y generalmente causan la muerte del árbol.

Phyllophaga rubella (Coleoptera)

Hospedero: *Pinus patula*.

Los adultos son de forma oval, alargada, que miden en promedio 12.8 mm de longitud, son de color café rojizo, con setas cortas en todo el cuerpo, antenas de tipo lamelado con 10 artejos, los últimos 3 aplanados y alargados hacia un lado. Larvas de tipo escarabeiforme, que maduras miden 30 cm de longitud y son de color crema sucio, cabeza de color café rojiza, abdomen dilatado y obscuro en los últimos dos segmentos. Huevecillos en forma oval que miden 2 mm de largo por 1 mm de ancho de color blanco aperlado.

Presenta un ciclo de vida anual. Los adultos emergen desde principios de mayo y se les encuentra hasta mediados de julio, razón por la cual se les conoce como “mayates de mayo”. Estos son fuertemente atraídos por la luz. Los adultos se alimentan del follaje del pino por un tiempo, las hembras liberan feromonas para atraer a los machos y realizar la cópula. Los huevecillos son puestos en la tierra cerca de las raíces a una profundidad de 10 a 20 cm; se encuentran desde mediados de junio hasta principios de septiembre y tienen un periodo de incubación de 17 días. Las larvas emergen de los huevos y se ali-

mentan de las raíces, a estas larvas se les conoce como gallinas ciegas. Contra este insecto se han aplicado insecticidas granulados alrededor de las plantas jóvenes, sin embargo, actualmente hay cepas de hongos entomopatógenos de los géneros *Metarrhizium* y *Bauveria*. Estos hongos se aplican en forma similar que los insecticidas granulados.

Bradysa spp. (Diptera)

Hospedero: *Pinus* spp.

Estas pequeñas moscas son comunes en los invernaderos y se le conoce como fungus gnat. Los adultos producen poco daño, sin embargo, las larvas pueden alimentarse de las raíces de plantas jóvenes, esquejes y semillas cuando las condiciones son favorables. La primera evidencia de infestación por fungus gnat es la presencia de los adultos, los cuales vuelan alrededor de la planta hospedera. Se trata de mosquitos de color oscuro. Las larvas se encuentran en la parte superior del sustrato, son gusanos apodos, semitransparentes, de cabeza negra y una longitud de 0.5 cm. La larva consume completamente las raíces más finas.

Las hembras ovopositan sus huevos sobre superficies húmedas y prefieren sustratos ricos en materia orgánica. Las infestaciones parecen ser más severas cuando los contenedores presentan algas y musgo. Los huevos se desarrollan en seis días y las larvas se alimentan por semanas, pupando sobre el sustrato. Después de cinco o seis días las mosquitas emergen completando su ciclo de vida. Debido a su ciclo de vida corto las poblaciones de fungus gnat pueden crecer rápidamente dentro del invernadero cuando la materia orgánica abunda y la humedad y temperatura son altas. Los métodos para su control incluyen insecticidas sistémicos y medidas sanitarias en el invernadero como son la limpieza de los contenedores infectados y el control de algas y musgos, en la Tabla siguiente se presenta una lista con los ingredientes activos recomendados para el combate de plagas.

Tabla 34
Ingredientes activos de insecticidas recomendados para el control de plagas.

Insecticidas	
Ingrediente activo	**Organismos que afectan**
Malathion	Chinches, fungus gnat.
Diazinon	Chinches, larvas, fungus gnat.
Dimetoato	Fungus gnat.
Carbaryl	Gallinas ciegas, larvas.
Endusolfan	Larvas.

NEMÁTODOS DEL SUELO

Es una plaga muy común y tiene fuertes efectos en el crecimiento de las plantas debido a que afecta el sistema radical. Esta plaga se detecta sacando una muestra de suelo que rodea el sistema radical de la planta y estimando la cantidad de gusanos que tiene, cuando a simple vista se observa una cantidad importante de ellos la plaga debe ser controlada. La forma de combatirla es empleando sustancias químicas (nematicidas) que se agregan en el suelo (Arriaga *et al*., 1994).

HONGOS

Cuando las condiciones debajo del vivero son de mucha humedad y poca luz, es frecuente que se presenten los hongos.

Particularmente, en las etapas iniciales de producción de plantas la enfermedad conocida como "*damping off*", mal de los almácigos o pudrición del cuello es causada por hongos que atacan semillas y plántulas después de la germinación (postemergente). Incluso la infección puede ocurrir antes de la germinación (preemergente). Los géneros asociados son *Pythium* spp., *Phythoptora* spp., *Rhizoctonia* spp., y *Fusarium* spp. Las plantas dañadas presentan una franja color café en la unión del tallo con la raíz, que es la herida que causa el hongo y que impide la circulación de savia (Arriaga *et al*., 1994; Landis, 1994).

Aparentemente las semillas de muchas coníferas son susceptibles. Las condiciones que pueden dar origen a esta enfermedad son diversas, por ejemplo, el pH, el drenaje, la excesiva humedad del suelo, la alta densidad de siembra, la textura del suelo, y el alto contenido de calcio y materia orgánica. Este problema se elimina mediante la aplicación de fungicidas de acción preventiva, de amplio espectro y curativa. Es recomendable quitar la sombra del vivero para permitir la ventilación y la iluminación directa. Debido a que muchos hongos que ocasionan el "*damping off*" se encuentran en las semillas, es necesario desinfectarlas antes de germinarlas. Los tratamientos de las semillas incluyen aplicaciones de cloro, peróxido de hidrógeno y fungicidas.

Moho gris. El hongo que genera el moho gris es *Botrytis cinerea* es uno de los hongos más dañinos en los viveros. El moho gris ataca principalmente a

las coníferas. La enfermedad es fácilmente detectada por el micelio gris algodonoso y las esporas masivas que se observan en el tejido infectado. Cuando la enfermedad progresa el tejido infectado se satura de agua y se desarrollan lesiones de color café. Debido a que el hongo es un saprófito agresivo, los síntomas primeramente aparecen sobre el follaje senescente y sombrío de la base del tallo. Bajo condiciones favorables *Botrytis cinerea* puede expandirse rápidamente de una plántula a otra. Produce abundantes esporas que pueden ser transportadas por el viento. Las esporas pueden germinar e infectar el follaje (Landis, 1994).

Los síntomas del moho gris son la necrosis del follaje, úlceras en el tallo y micelio y conidióforos sobre la superficie foliar afectada. El hongo es capaz de sobrevivir a condiciones adversas formando estructuras resistentes llamadas esclerotias. Este patógeno puede controlarse generando condiciones ambientales poco favorables y aplicando fungicidas. En la siguiente Tabla se presentan los ingredientes activos de algunos fungicidas recomendados para prevenir y controlar infecciones causadas por estos organismos.

Tabla 35
Ingredientes activos de fungicidas recomendados para prevenir y controlar infecciones.

Ingrediente activo
Benomil
Thiram
Captan
Clorotalonil

G. Estrategias para prevenir plagas y enfermedades.

En un vivero la filosofía debe estar enfocada en la prevención más que en la cura de plagas y enfermedades. Algunas de las prácticas de manejo que se implementarán como medidas de prevención son las siguientes (Landis, 1994):

- Eliminación de herbáceas y arbustos que se encuentren dentro del vivero, se sabe que muchos de éstos son huéspedes secundarios de insectos.
- Esterilización de las semillas colectadas con hipoclorito de sodio (cloro comercial) al 5% durante 5 minutos, para evitar la aparición de hongos, bacterias y virus.
- Aplicación de fungicida de acción preventiva y curativa a las semillas.
- Esterilización de charolas de germinación con hipoclorito de sodio (cloro) al 10% durante 15 minutos.

- En el invernadero se colocará una malla para impedir el paso de aves y roedores.
- Ventilación periódica en el invernadero.

H. Medidas de seguridad al aplicar pesticidas.

Todos los pesticidas son venenosos, por lo tanto, deben ser aplicados con precaución. Los fungicidas y los herbicidas generalmente son menos tóxicos que los insecticidas. Se recomienda seguir las siguientes reglas cuando se apliquen pesticidas (Landis, 1994):

- Utilizar ropa adecuada y equipo de protección.
- Tener a la mano los antídotos contra el efecto tóxico del pesticida.
- Ver el grado de toxicidad e instrucciones de uso antes de aplicar el pesticida.
- Nunca se debe comer, beber o fumar cuando los pesticidas sean aplicados.
- Nunca se debe estar solo cuando se apliquen pesticidas.

I. Micorrización.

En los suelos forestales todas las especies arbóreas forman asociaciones simbióticas mutuamente benéficas para las raíces y hongos del suelo. El hongo es conocido como micorriza, la cual proporciona múltiples beneficios a plántulas y árboles adultos, particularmente ayudan a la absorción de agua y nutrimentos. La palabra micorriza literalmente significa hongo de la raíz. Casi todas las plantas establecen asociaciones con las micorrizas. Existen dos grupos importantes de micorrizas forestales: las ectomicorrizas, vinculadas con importantes especies de pinos, encinos y ailes, y las micorrizas vesículo arbusculares, las cuales son comunes en el maple, liquidámbar y cedros (Landis, 1993).

- **Ectomicorrizas.** Las ectomicorrizas se desarrollan sobre las raíces más finas y absorbentes. Son fácilmente reconocibles por el tejido fúngico que envuelve las raíces absorbentes. Las hifas entran en contacto con las células epidermales y corticales de las raíces, en esta zona es donde el hongo proporciona nutrimentos y agua al hospedero, a cambio recibe azúcares y otros productos de la fotosíntesis (Landis, 1993). Los hongos que forman ectomicorrizas son en primer lugar Basidiomycotina (*Amanita*, *Boletus*, *Hebeloma*, *Laccaria*, *Lactarius*, *Pisolithus*, *Rhizophogon*, *Russula*, *Scleroderma*, *Suillus*, *Thelephora* y *Tricholoma*) y Ascomycotina (*Cenococcum* y *Tuber*), y los hongos comunes de áreas forestales incluyendo trufas y pelotitas sopladoras.

  La morfología de las ectomicorrizas depende tanto del hongo como de las raíces. Cientos de hongos forman ectomicorrizas muchas con más de una planta hospedera. La morfología es característica para un género en particular. Las ectomicorrizas en los pinos frecuentemente son ramas dicotómicas. Aunque similares en las funciones que desempeñan, las ectomicorrizas y las micorrizas vesículo arbusculares difieren en la forma que las raíces están relacionadas con el hongo y su morfología. Muchas ectomicorrizas producen esporas que son diseminadas por el viento, permitiendo la dispersión de esporas del bosque a los viveros (Landis, 1993).

- **Micorriza vesículo arbuscular.** Estas micorrizas no modifican la morfología de las raíces y los componentes fúngicos no son visibles a simple vista. Las raíces deben ser observadas en un microscopio para diferenciar el hongo y el proceso de colonización. Dos estructuras caracterizan estas micorrizas; las vesículas, estructuras en forma de balón usualmente llenos de aceite, que sirven como órganos almacenadores de energía y como estructuras reproductivas y los arbúsculos ramas finas, intracelulares, estructuras de vida corta que sirven como sitios de intercambio de nutrimentos entre el hongo y el hospedero. Zygomycotous pertenecientes a la familia Endogonaceae forman micorrizas vesículo arbusculares. Los géneros más comunes son *Acaulospora*, *Entrophospora*, *Gigaspora*, *Glomus*, *Sclerocystis* y *Scutellospora*. Las micorrizas vesículo arbusculares usualmente forman esporas solitarias relativamente largas (30 a 90 μm de diámetro). Debido a su tamaño y localización las esporas no son transportadas por el viento. Su movimiento se da por el movimiento del suelo y pequeños animales e insectos (Landis, 1993).

  Las micorrizas favorecen la nutrición forestal, el crecimiento y la supervivencia, los beneficios más conocidos son la absorción de agua y nutrimentos especialmente fósforo y nitrógeno. Las hifas pueden explorar cientos de veces más superficie que las raíces. Las ectomicorrizas también reducen la respiración de las raíces, aumentando la longevidad de éstas. Las hifas también pueden proteger a las raíces de patógenos, reducen el estrés por sequía y aumentan la tolerancia a las sales.

Aprovechando que el suelo forestal contiene una cantidad importante de micorrizas, una técnica sencilla para inocular plántulas en vivero es mezclando 10% de este suelo (humus y mantillo) con tierra negra (horizonte Ah). Otra técnica que puede implementarse es macerando cuerpos fructíferos de algunos hongos micorrizicos (setas, bolitas sopladoras, o trufas) que se encuentren en el campo. Para preparar el inóculo, los cuerpos fructíferos se limpian con agua y se pican finamente, posteriormente se mezclan con agua hasta quedar homogénea. La suspensión se riega directamente al sustrato en el que se están desarrollando las plantas. Esta técnica se aplicará en la medida en la que se encuentren cuerpos fructíferos en el campo y sólo será aplicada a las plantas propagadas a partir de semillas. Las plantas rescatadas provienen de zonas forestales y por lo que ya han sido inoculadas de manera natural. No se comprarán inóculos comerciales puesto que no se conoce su efectividad en las especies que se están propagando y podrían afectar a las poblaciones de micorrizas nativas.

Algunos factores que afectan el desarrollo de las micorrizas son la fertilización, las plantas responden mejor a la micorrización en suelos con baja fertilidad; agua, un exceso o una disminución en el abastecimiento de agua disminuye la formación de raíces absorbentes y por lo tanto de micorrizas; pesticidas, muchos fungicidas son específicos para ciertos grupos de hongos, que empleados en dosis bajas no inhiben el crecimiento de las micorrizas.

Figura 46
Raíces de *Quercus sp.*, inoculadas de manera natural con ectomicorrizas.



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

J. Medidas de protección del vivero.

Protección contra aves y roedores. Las aves y los roedores son especialmente dañinos durante la época de siembra y el crecimiento de las plántulas, comen las semillas de todo tipo de coníferas. Los roedores se alimentan principalmente durante la noche, mientras que las aves lo hacen en el día. Las aves también causan daño a las plántulas emergentes. Para protegerse de ellos se emplean cuadros de alambre tejidos, preferentemente móviles. La colocación de espantapájaros es común, aunque también se utilizan repelentes que contienen como agente activo "Atrachinon" ($C_{14}H_8O_2$). Estos productos tienen también efecto sobre los roedores (Arriaga *et al*., 1994; Landis, 1994).

Vigilancia del vivero. El vivero deberá contar preferentemente con vigilancia las 24 horas del día, sin embargo, en la práctica esto puede ser complicado ya que los costos se elevan de forma considerable, por lo que se recomienda contar con un buen cercado y que el vivero quede con el mejor resguardo posible. Con lo anterior se evitará que se introduzcan animales como el ganado, perros o incluso personas ajenas a las instalaciones.

K. Deshierbe del vivero.

El objetivo es eliminar la competencia por luz, nutrimentos y agua que se establece entre las plantas de interés (en este caso plántulas de especies arbóreas nativas) y las malezas que germinan dentro de las bolsas. Esta actividad debe realizarse frecuentemente, el número de deshierbes depende de que tan abundante sea el crecimiento de las malezas. Los deshierbes se realizarán manualmente y con azadón, procurando siempre que la maleza sea removida desde la raíz.

Asimismo, se recomienda la poda de rebrotes para que el crecimiento de los árboles se concentre en un solo eje y se obtengan mejores tasas de crecimiento. Además, se podarán las ramas presentes en la parte baja del tallo. La poda de rebrotes se llevará a cabo una vez que las plantas estén bien establecidas en el vivero y se hayan recuperado del estrés del trasplante, tal como se observa en la Figura siguiente.

Figura 47
Poda de formaciones en especies arbóreas para concentrar el crecimiento de las plantas en un solo tallo.



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

L. Endurecimiento de las plantas.

El endurecimiento es un proceso fisiológico interno que generalmente se desarrolla durante el estado de reposo y que representa un estado de mayor resistencia en toda la planta. Las plantas propagadas en el vivero deben tener una calidad óptima para soportar las condiciones de perturbación que prevalecen en los sitios de revegetación.

El concepto de calidad es relativo, influyen muchos factores para poder determinarla como: la especie, las condiciones ambientales, la época de plantación, la preparación del terreno, y el objetivo de la plantación. Además, la calidad de la planta es efímera, pudiendo perderse poco tiempo después de salir del vivero si no se mantienen los cuidados adecuados. Las plantas en el vivero pueden comenzar su acondicionamiento al estrés de forma natural, por su exposición a las condiciones ambientales, pero es posible acelerar, mejorar y/o completar dicho proceso modificando convenientemente factores como la temperatura, el fotoperiodo, el riego, la fertilización y la humedad relativa, factores que conviene aplicar a las plantas paulatinamente, para no incluir un alto grado de estrés que pueda revertir el proceso. Por los ambientes que se generan en los sitios de revegetación debe prestarse mayor atención al endurecimiento inducido por el estrés hídrico, por la nutrición y por las altas temperaturas.

3.3 Preparación y limpieza del terreno

El objetivo de preparar el sitio es mejorar las condiciones del suelo para asegurar una mayor sobrevivencia y facilitar las labores de la plantación. Estas actividades se deben realizar antes del establecimiento de las plantas y posterior a éste.

Para el caso de los sitios afectados por la ocupación de bancos de materiales, campamentos, bancos de tiro, terrenos abandonados por la rectificación de trazos carreteros, entre otros; en esta etapa se tiene que considerar la nivelación o descompactación del suelo, decisión que tomará el especialista ambiental que elaboré la propuesta de revegetación.

La limpieza de los predios por revegetar es clave para el buen desarrollo de las plantas a establecer porque una de las funciones principales de la limpieza es eliminar la competencia entre los individuos plantados y la maleza o plantas pioneras que pudieran existir y con ello, facilitar el arraigo de los árboles plantados. Otra función es eliminar los objetos ajenos al sitio, como pueden ser residuos como el cascajo y basura inorgánica.

Dependiendo del tamaño de los recursos materiales, económicos y humanos la limpieza se podrá hacer en todo el predio o solamente en las hileras donde se plantará cada individuo. Es recomendable retirar a la maleza de todo el terreno para retrasar su aparición y con ello el mantenimiento, aunque se podrán dejar aquellos arbustos y árboles existentes para que provean de sombra a algunos organismos plantados, además de evitar la erosión del suelo (PPD-PNUD/GEF Panamá, 2019).

La limpieza, deshierbe o chaponeo es la eliminación, por medios manuales o mecánicos, de las malezas. La eliminación manual se realiza con herramientas como las palas, picos, machetes y otras de uso común, se recomienda la limpieza manual en

sitios de difícil acceso a la maquinaria o cuando la superficie es menor a 10 hectáreas (Comisión Nacional Forestal, 2010); mientras que la limpieza mecánica incluye el uso de maquinaria con subsolador u otros mecanismos para revolver el suelo y eliminar la vegetación herbácea. En ambos tipos de limpieza se debe sacar la maleza desde la raíz para evitar o prolongar el tiempo para que vuelvan a aparecer.

Figura 48
Limpieza manual y mecanizada.



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

3.3.1 Manejo del material vegetal extraído de las obras

El material producto del desmonte (ramas delgadas, arbustos, entre otros) de las áreas que serán ocupadas por la infraestructura carretera, se recomienda sea acopiado y triturado en el sitio para posteriormente ser mezclado con el horizonte orgánico del suelo producto del despalme.

Generalmente, la madera de los árboles talados es proporcionada a los habitantes de las comunidades aledañas al proyecto para su aprovechamiento. Sin embargo, las ramas finas y las hojas pueden aprovecharse para procesarse y producir composta. Las ramas pueden procesarse en una máquina trituradora para producir pequeños pedazos de madera (conocidos como chips), que pueden emplearse en la preparación de la composta o para producir biocarbón. Ambas enmiendas (compostas y biocarbón) pueden emplearse para preparar los Tecnosoles requeridos en la propagación de plantas en vivero, o para mejorar la calidad de los suelos disturbados de los sitios de revegetación.

Si ya se tienen identificadas y gestionadas las áreas susceptibles para la revegetación, se recomienda que el suelo orgánico rescatado sea llevado a esas áreas para utilizarlo como mejorador de suelo y sirva como banco de germoplasma de herbáceas que se verán afectadas por la construcción del proyecto. De no tener certeza de las zonas que serán revegetadas este material tiene que ser acopiado en un sitio cercano o acamellonado en el límite del derecho de vía para su posterior recuperación y llevado posteriormente a las zonas propuestas para la revegetación, tal como se observa en la siguiente Figura.

Figura 49
Material vegetal triturado que será utilizado en áreas a reforestar.



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

3.3.2 Prácticas para la protección contra incendios (brechas cortafuego)

El peligro de incendios es un factor de alta consideración para todos los trabajos de revegetación que involucren especies vegetales.

Para minimizar riesgos es necesario identificar los riesgos potenciales que pueden acaecer sobre cada polígono revegetado o reforestado, además de implementar acciones preventivas y, en el caso de registrarse un incendio, se deben emplear las técnicas de combate más apropiadas de acuerdo con las herramientas y personas disponibles, así como la peligrosidad de éste.

En polígonos con masas revegetadas o reforestadas aglomeradas y consolidadas es factible realizar diversas prácticas de prevención de incendios como la apertura de brechas cortafuego y habilitación de líneas negras, entre otras.

3.3.2.1 Apertura de brechas cortafuego

Consiste en abrir líneas o franjas de dos a tres metros de ancho, dependiendo de las condiciones del terreno y el objetivo de la práctica. Con la apertura de las brechas se busca eliminar todo el material combustible que se encuentre en las zonas críticas de la plantación para evitar que pueda provocar un incendio. Con este trabajo se logra aislar y proteger las áreas reforestadas. Además, se le debe dar rehabilitación de brechas cortafuego constante después que ya se tengan las brechas al menos una vez al año, eliminando todo el material que pueda convertirse en combustible y dañar la reforestación en caso de incendio. Es conveniente no esperar a que la brecha haya sido cubierta en su totalidad (CONAFOR, 2010). A continuación se presenta una Figura con la ejemplificación de la apertura de una brecha cortafuego.

Figura 50
Apertura de brecha cortafuego.



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

3.3.2.2 Líneas negras

Consiste en la limpieza de vegetación forestal mediante el uso planificado del fuego, siempre y cuando se tenga conocimiento sobre el desarrollo de esta práctica (CONAFOR, 2010). El ancho de la franja es variable, pero se puede considerar las mismas dimensiones que una brecha cortafuego.

Figura 51
Apertura de líneas negras.



Fuente: CONAFOR, 2010.

3.3.2.3 Mensajes informativos

Para proteger la reforestación se debe considerar la elaboración y colocación de mensajes en los límites del área de plantación, sobre todo donde los caminos llegan al sitio. Los mensajes deben incluir la información básica, como superficie plantada, especies utilizadas, año de establecimiento, dependencias responsables y advertencias de lo que no está permitido hacer dentro del área y a quién deben reportarse las irregularidades o emergencias. Los mensajes deben elaborarse con material durable (CONAFOR, 2010). En la siguiente Figura se presenta un ejemplo de mensaje informativo para la prevención de incendios.

Figura 52
Ejemplo de mensaje informativo para la prevención de incendios.



Fuente: CONAFOR, 2010.

3.3.2.4 Brechas individuales contra incendios

En sitios revegetadas con masas más pequeñas o con diseño lineal y donde el estrato herbáceo se convierta durante la temporada de estiaje en materia combustible; las plantas se pueden encontrar severamente amenazadas por los incendios (Kerkus; 2019 y 2020) para ello se utiliza una técnica preventiva complementaria al mantenimiento de la revegetación, la "habilitación de brechas individuales corta incendios", que consiste en quitar la vegetación circundante al cajete de cada individuo reforestado con un ancho aproximado de 35 cm, tal como se observa en la siguiente Figura.

Figura 53
Ejemplos de habilitación de brechas individuales contra incendios.



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

Esta técnica surge de la necesidad de disminuir la mortandad por incendios provocados durante la zafra de la caña (cultivo vecino a la revegetación) que están presentes durante la temporada de secas.

Además, es un complemento a las acciones de retención de humedad dentro del cajete (se debe recordar que en vegetaciones de clima tropical la pérdida de humedad y desecación del suelo es otro factor de sobrevivencia en plantaciones principalmente recién reforestadas) ya que dentro del cajete se puede colocar materia vegetal acolchada que funciona como un retenedor de humedad reduciendo la evaporación del agua de riego. Sin embargo, si ya no se encuentra húmedo este acolchado se convierte en material combustible de riesgo en caso de incendio.

El objetivo de retirar la vegetación circundante al cajete se enfoca en disminuir la posibilidad que el fuego llegue al tallo principal del árbol, así como alejar la radiación provocada que puede dañar principalmente la parte superior del arbolado. A continuación, se presenta un ejemplo de éxito de la habilitación de brechas individuales en una reforestación.

3.3.3 Cercado de sitio para protección contra animales

La función principal de esta actividad es evitar la destrucción o daño de la revegetación por posibles agentes causados por la actividad humana o por animales. Por lo tanto, es recomendable que las áreas a revegetar o reforestar sean cercadas previo a toda actividad, ya que al no realizar esta protección las plantas a establecer se vuelven más susceptibles a posibles daños.

Por lo general los sitios que se disponen para realizar acciones de revegetación se encuentran circundadas a actividades primarias como lo es la ganadería. Para ello ya se ha venido mencionando la necesidad de colaboración con los propietarios o administradores de estos sitios para incluir en el convenio la necesidad de realizar el cercado perimetral de cada sitio.

Primero se debe identificar el posible agente causal del daño a la revegetación, y proceder a implementar la protección específica y adecuada al predio, considerando su oportunidad, los materiales a utilizar, la participación de los dueños y factores extremos.

Se pueden considerar tres tipos de protección de acuerdo con el tamaño de los animales (CONAFOR, 2010):

Figura 54
Caso exitoso de la habilitación de brechas individuales contra incendios durante un incendio.



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

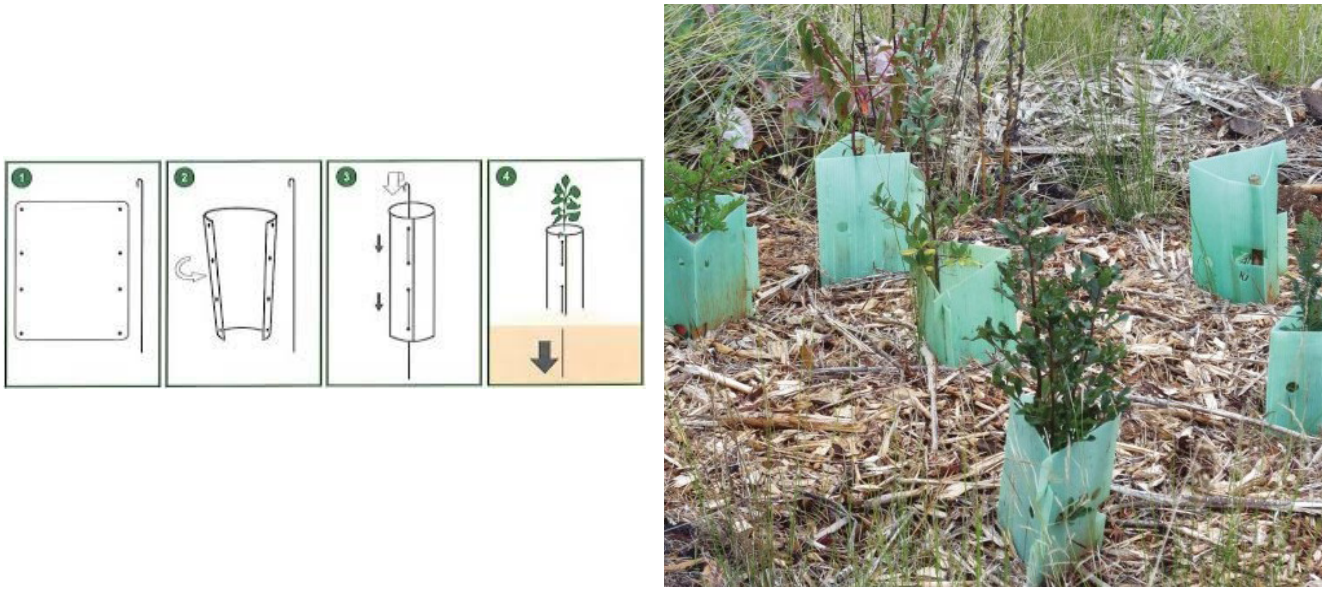
A. **Animales de porte mayor.** Se refiere al ganado vacuno, equino y a todo tipo de animales que se pueda controlar con un cercado de tres a cuatro líneas de alambre. El daño que provocan a las plantas es por pisoteo, además de que compactan el suelo impidiendo la correcta oxigenación de las raíces y el paso del agua.

B. **Animales de porte medio.** Incluye el ganado ovino, sobre todo el caprino, que causa más daños a las plantaciones por su enorme capacidad digestiva y su dieta multi específica. El costo que implica la protección contra este tipo de animales en relación con el anterior es mayor, debido a que se requiere un sistema de cercado diferente para poder proteger la plantación. Se puede emplear el cerco con alambre con los hilos más juntos (15 cm cada uno) o el cerco con malla ciclónica.

C. **Animales de porte bajo.** Abarca todo tipo de animales silvestres como conejos, liebres, ciervos, tuzas y algunas especies de aves, entre otros. Para impedir el acceso de éstos al área revegetada o reforestada, se pueden construir murallas de piedra o colocar cercos con malla ciclónica o borreguera (CONAFOR, 2010).

Según sea la presencia de herbívoros, es fundamental considerar la protección de los ejemplares una vez plantados, esto es posible instalando una barrera física alrededor de cada planta, este protector puede ser de plástico y de diseño variado. Independiente del tipo de protector que se utilice la instalación del protector se realiza cuidando que la parte inferior de éste quede en contacto con el suelo, para dar sujeción al protector se instala un tutor, el que será adherido al protector mediante amarre de alambre dulce o abrazadera plástica, corchetes o grapas. El protector será instalado inmediatamente después de poner la planta. El plantador debe velar porque el tutor no dañe la parte radicular de las plantas, para ello se debe instalar el tutor a una distancia de al menos 5 cm desde el fuste de la planta (Seremi de Medio Ambiente del Biobío, 2020). Enseguida se presentan ejemplos de protectores de arbolado para evitar afectación por animales.

Figura 55
Ejemplo de protectores de árbol contra animales.



Fuente: Seremi de Medio Ambiente del Biobío, 2020.

De acuerdo con el tipo de revegetación y al material que se puede disponer existen diferentes tipos de cercado contra animales de porte medio y alto, algunos de estos tipos son: cerco de piedra, cerco de alambre de púas y cerco vivo (CONAFOR, 2010).

3.3.3.1 Cerco de piedra

Se recomienda la delimitación de un predio con cerco de piedra cuando se trata de superficies menores de 15 ha. Para ello se utiliza piedra que se encuentre dentro del predio. Si la piedra se consigue en las cercanías del sitio, se debe considerar los costos del acarreo.

Cuando se cuente con el cerco levantado se deberá darle mantenimiento procurando que siempre las piedras estén bien colocadas en su sitio. En la siguiente Figura se presenta un ejemplo de la apertura de un cerco de piedra.

Figura 56
Ejemplo de cercado con piedra.



Fuente: CONAFOR, 2010.

3.3.3.2 Cerco de alambre de púas

Este cerco se caracteriza por su rigidez, la cual deriva de la corta distancia entre postes y el uso de alambre de púas, grapas, tubos o ángulos metálicos. La distancia entre postes debe ser de 4 m como máximo, dependiendo de la topografía del terreno, del material y del tamaño de los postes; y con un mínimo de cuatro hilos de alambre de púas. Este tipo de cerco es costoso debido a la cantidad de postes que se utilizan y al costo del alambre. Sin embargo, es el más generalizado debido a su rápida colocación, instalación y durabilidad.

Si al realizar el cerco se encuentran árboles en la línea limítrofe de éste, se pueden aprovechar sus troncos para colocar en ellos el alambre o malla, procurando no dañarlos.

Los postes de madera deben ser lo más rectos posible para dar una sola línea; su vida útil depende de la resistencia de la especie y de las condiciones climatológicas de la región.

Dentro del derecho de vía de las obras de infraestructura carretera, el límite que marca estas áreas puede estar delimitado por un cercado de postes de concreto y alambre de púas que bien puede funcionar como protección a la revegetación, tal como se observa en la siguiente Figura.

Figura 57
Ejemplo del cercado en el derecho de vía.



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

3.3.3.3 Cerco vivo

Consiste en utilizar postes vivos plantados directamente en la tierra con la intención de que produzcan raíces y se conviertan en árboles. Constituyen una de las principales alternativas para reducir los excesivos gastos por concepto de mano de obra e insumos que, año con año, son requeridos para la construcción y rehabilitación de cercos en áreas tropicales y subtropicales (CONAFOR, 2010).

Cabe señalar que este tipo de cercado es un excelente complemento a las acciones de revegetación tanto en obras de infraestructura carretera y vías férreas ya que de aplicarse correctamente en estos espacios no solamente estarán realizando acciones de protección y de revegetación, sino que se pueden complementar con obras asociadas a la conservación de la fauna y sus obras asociadas (Iuell, *et al*., 2005).

Se recomienda en general la plantación de especies nativas, de preferencia de uso múltiple y con buena producción de biomasa.

Para elaborar este tipo de cerco se utilizan leguminosas arbóreas de diferentes especies que, además de servir para la delimitación de potreros, tienen un potencial de producción de forraje en la época seca, que es cuando más se necesita contar con un alimento fresco de buena calidad, y constituyen una forma de reducir la presión sobre el bosque para la obtención de postes y leña.

Según el *Manual de Modelos de Recuperación Forestal* (CONAFOR, 2010b) en ecosistemas de selvas bajas y medianas caducifolios y subcaducifolios las especies aptas para cercos vivos que funcionan como postes para sostener el cercado son, palo mulato (*Bursera simaruba*), copal (*Bursera spp.)*, guaje (*Leucaena spp.*), matarratón (*Gliricdia sepium*), chompantle (*Eruthrina spp.*), tepeguaje (*Lysiloma acapulcensis, L. divaricatun*), zopilote o caobilla (*Swietenia humillis*), árbol del nim (*Azadirachta indica*), guamúchil (*Pithecellobium dulce*), mezquite (*Prosopis leavigta, P. juliflora*) y varduz (*Eysenhardtia polystachya*).

En ecosistemas templados las especies aptas son: nogal (*Junglans spp.*), encino (*Quercus spp.*), capulín (*Prunus spp.*), cedro blanco (*Cupressus lindleyii*), Pino (*Pinus spp.*) y oyamel (*Abies religiosa*).

Algunas otras especies tienen una alta densidad vegetativa pueden también disminuir la velocidad de los escurrimientos superficiales y que también se pueden poner como cercos vivos en zonas áridas: huizache (*Acacia spp.*), chichicastle (*Wigandia caracasana*), garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*), nopal (*Opntia spp*), maguey (*Agave spp.*) y zarzamora (*Rubus spp.*). A continuación, se presenta un ejemplo de cerco vivo utilizando material vegetativo con especies de porte arbóreo.

Figura 58
Ejemplo de cerco vivo.



Fuente: CONAFOR, 2010.

3.4 Siembra y plantación

Es importante distinguir que siembra y plantación son actividades diferentes. Por lo tanto, al realizar o desarrollar una propuesta de revegetación se debe tener en cuenta los alcances de cada actividad, ya que la siembra se define como aquella actividad de arrojar o esparcir las semillas en la tierra, a comparación de la plantación, la cual, radica en establecer una planta en el suelo, que ya ha pasado por un proceso de reproducción, ya sea sexual o asexual.

3.4.1 Métodos de siembra

La siembra es la distribución de las semillas con el propósito de establecer plántulas en una densidad y composición de especies deseada. Además de tener cuidado en la preparación de los sitios y tratamientos pregerminativos, las operaciones de siembra deberían incluir la uniformidad de distribución de las semillas en un área, la composición en la mezcla de semillas, y en qué momento llevar a cabo la siembra. Estos factores deberían ser considerados en las diferentes unidades de revegetación, para tomar en cuenta las condiciones únicas de clima, suelos y requerimientos de las especies.

La siembra frecuentemente se acopla con otras operaciones, como la fertilización, aplicaciones para mejorar los suelos, y los tratamientos para estabilizar el suelo.

A continuación se describen los pasos recomendados para el desarrollo de un plan de siembra.

A. Identificar las áreas de siembra.

Es importante visitar el sitio del proyecto lo más pronto posible específicamente para identificar las áreas de siembra en el suelo. Si el proyecto está programado para varios años, cuando se termine con los trabajos de construcción en los cortes, éstos deberían ser evaluados para sembrarse, mientras el resto de la construcción continúa. La siembra puede contribuir a la estabilización de la ladera. Un revisor de campo debe observar los sitios en los que el suelo superficial fue colocado, la presencia de rocas superficiales, la aspereza del suelo, la accesibilidad del equipo, el microclima, la compactación del suelo y otros factores del sitio, mismos que deben ser utilizados para desarrollar los métodos de siembra, determinar la fecha de siembra, las mezclas de semillas, y las tasas de siembra para cada una de las áreas.

Las áreas de siembra pueden ser colocadas en un mapa. Para cada área de siembra, puede calcularse su superficie. Estos cálculos deberían considerar las áreas donde los herbicidas pueden ser utilizados para el mantenimiento. Al final se debe obtener una superficie total que será usada para calcular la cantidad y mezcla de las especies.

B. Determinar los métodos de siembra.

Existen diversos métodos para aplicarlos a las semillas, sin embargo, el reto es embonar estos métodos a los sitios encontrados en los terrenos montañosos. Las características del sitio en cada área de siembra establecerán el tipo de método de siembra que se empleará. Por ejemplo, un proyecto de camino puede tener tres unidades de vegetación: una ladera empinada y orientada hacia el norte, un camino obliterado y una ladera rocosa orientada hacia el sur. En el caso de la ladera empinada y orientada hacia el norte, la hidrosiembra podría ser una posibilidad porque otros equipos no pueden llegar. En el camino obliterado, varios métodos de siembra podrían ser utilizados, incluyendo la mezcla de semillas en el suelo o dispersadas en la superficie y cubiertas con un acolchado (*mulch*). La ladera que ve hacia el sur puede ser sembrada a mano y posteriormente cubierta por un acolchado para proteger a las semillas de la desecación durante la germinación o hidrosiembra, usando una matriz de fibra como colchado. Cada proyecto muy probablemente tendrá estrategias de siembra específicas para cada sitio, de tal forma que se proporcionen las condiciones óptimas para la germinación.

Cada especie de planta tiene requerimientos de cobertura de semillas específicos. Algunas especies deberían ser enterradas en el suelo o cubiertas por acolchados para germinar, otras especies requieren una exposición parcial a la luz para germinar y no debería cubrirse profundamente. Una regla general para cubrir semillas es enterrar las semillas a una profundidad de 2 (Munshower, 1994) a 3 veces su diámetro (Monsen y Stevens, 2004). Entre más profunda se siembre la semilla, es menos probable que se

deshidrate durante la germinación. Sin embargo, la contraparte es que las plántulas cuyas semillas se sembraron profundamente, tendrán que gastar más energía para emerger. Esto puede afectar el establecimiento de las plántulas.

Idealmente se recomienda que la semilla esté firmemente sujeta entre las partículas del suelo, para proporcionar una conductividad hidráulica de humedad a la semilla (Monsen y Stevens, 2004). Las semillas deberían colocarse lo suficientemente profundas para prevenir un desecamiento rápido, pero lo suficientemente someras para permitir la emergencia natural. Crear un ambiente natural para las semillas es una práctica importante, especialmente en viveros y jardines donde el objetivo es producir una cosecha de plantas uniforme. Todas estas operaciones deben estandarizarse y uniformizarse (p. ej. profundidad correcta de siembra, luz óptima, irrigación uniforme y densidad de semillas uniforme).

La posición vertical de las semillas, donde las semillas son distribuidas verticalmente en el suelo o acolchados, puede ser agrupada en las siguientes categorías.

Los métodos de ubicación vertical de las semillas son discutidos en las siguientes secciones, en el contexto de cómo afectan la germinación y el establecimiento de plántulas.

- **Siembra de semillas en la superficie del suelo**. Una de las formas más comunes de siembra es la dispersión de semillas, en el que las semillas se diseminan en la superficie del suelo con un dispersor rotativo o a mano. Esta técnica es casi siempre la forma más económica de sembrar. Los dispersores rotativos se pueden incorporar a vehículos, incluyendo los vehículos todo terreno y pick ups, y se emplean en donde la accesibilidad del vehículo es adecuada. Donde la pendiente o la accesibilidad limita la siembra mecánica, el uso de la siembra a mano es una opción viable. Aunque la siembra manual puede ser considerada como un método de baja tecnología, tiene un lugar importante en la revegetación.
- **Dispersión manual de semillas.** Ofrece la oportunidad de emplear diferentes porcentajes y mezclas de semillas. Por ejemplo, dos personas podrían sembrar a mano un corte con una pendiente pronunciada que requiere dos mezclas diferentes de semillas. La parte inferior del corte se sembraría con semillas de pasto y hierbas, y la porción superior del corte con un arbusto y mezcla de semillas.

  La desventaja de la siembra por dispersión es que las semillas no son cubiertas por suelo o acolchados. Porque las semillas necesitan un contacto directo con el suelo para germinar. Esta técnica tiene un bajo establecimiento de plántulas. Si se emplean grandes cantidades de semillas, algunas de ellas encontrarán micrositios con una alta humedad (entre gravas superficiales o rocas) o puede ser cubierta por partículas de suelo que han sido movidas por procesos erosivos. Se estima que deberían sembrarse entre 50 y 75% más semillas para compensar la inhabilidad de las semillas para germinar o la pérdida de semillas por los roedores (Monsen y Stevens, 2004). Factores de supervivencia deberían ser ajustados cuando se calculen las tasas de siembra para mezcla de semillas. La siembra por dispersión en superficies rugosas potencialmente puede aumentar las tasas de germinación. La probabilidad de que las semillas sean cubiertas por suelo incrementará con el tiempo (Stevens y Monsen, 2004). Es importante que la superficie del suelo sea lo más rugosa posible cuando se emplee la siembra por dispersión.

- **Semillas presionadas contra la superficie del suelo.** Las semillas que se siembran en la superficie y son presionadas contra el suelo aumentan las tasas de germinación en comparación con la siembra por dispersión. Las semillas están en firme, en contacto directo con el suelo, lo cual incrementa la disponibilidad de agua para las semillas (Stevens y Van Epps, 1984). La presión que se ejerce sobre las semillas produce una variedad de micrositios que puede beneficiar la germinación de múltiples especies (Stevens y Monsen, 2004). En este tipo de siembra se emplea un equipo especial que se encarga de presionar las semillas contra el suelo. Esta técnica funciona bien para semillas de tamaño pequeño a medio. Las semillas están en contacto firme con el suelo, pero no enterradas muy profundamente, de tal forma que no afectan la emergencia. Las semillas grandes deberían ser cubiertas con suelo o acolchados para una adecuada germinación. No se recomienda emplear esta técnica en cortes con pendientes pronunciadas o pendientes con altos porcentajes de rocas.
- **Mezcla de semillas bajo la superficie del suelo.** Es una de las mejores formas de alcanzar la germinación óptima. La mezcla es hecha en dos formas: las semillas son aplicadas en la superficie del suelo por equipos (sembradoras) o usando una caja de semillas y tubos de descenso, las semillas son incorporadas en el suelo con cadenas de arrastre, cadenas de disco, cables y otros implementos detrás de tractores u otros vehículos todo terreno. Estos equipos han sido desarrollados para las condiciones de campo, al mismo tiempo subsolean, dispersan y mezclan las semillas en una sola operación.

  El uso de estos equipos es limitado por la inclinación de los cortes, además de que no debe haber rocas en la superficie. Las semillas no deben sembrarse a una profundidad mayor a 2.5 cm. Estos equipos permiten que las semillas sean dispersadas a través del suelo y no se concentren en filas. Sin embargo, se pierde un poco de suelo alrededor de las semillas por lo que decrece la capacidad de retención de agua disponible y el contacto directo entre el suelo y las semillas.
- **Cubierta de semillas con acolchados de fibra larga.** La geminación óptima se obtiene con acolchados de fibra larga. El acolchado proporciona una barrera húmeda que protege a las semillas y al suelo de la resequedad. La humedad del suelo se mantiene por más tiempo alrededor de las semillas que cuando solo se cubren con suelo. Es una operación conformada por dos pasos, en el primero las semillas se dispersan en el suelo y posteriormente éstas se cubren con un acolchado. Las semillas pequeñas requieren menos acolchado que las semillas grandes.

C. Mezcla de semillas.

Se refiere a la composición de especies que se están sembrando en un área. Los sitios perturbados son variables en cuanto a temperatura del suelo, fertilidad, humedad del suelo y radiación solar. Es importante aplicar varias especies al mismo tiempo para asegurar que el sitio se cubra con vegetación. Los sitios que son desfavorables para una especie pueden ser favorables para otra. Debe evitarse mezclar especies de rápido crecimiento con especies de lento crecimiento porque las especies de rápido crecimiento competirán más eficientemente que las de lento crecimiento por espacio y recursos (Monsen y Stevens, 2004). Los arbustos y los árboles gene-

ralmente son menos agresivos que los pastos durante la fase de establecimiento y deberían aplicarse en una mezcla por separado o los árboles deberían ser plantados como plántulas. Los pastos también suelen ser más agresivos que las hierbas, por lo que deberán sembrarse por separado. Una mezcla de plantas anuales de rápido crecimiento y plantas perennes de lento crecimiento podría asegurar la cobertura vegetal el primer año con las especies de rápido crecimiento y plantas perennes robustas en los años sucesivos.

D. Determinar la proporción de siembra.

Es la cantidad de semillas de cada especie en una mezcla de semillas que es aplicada en un área determinada. Las tasas de siembra se calculan para cada especie que conforma la mezcla de semillas.

El dato se obtiene con la siguiente fórmula:

$$(A*B/100)*(C/100)$$

Donde:

A = número de semillas por kilo.

B = pureza de las semillas.

C = porcentaje de germinación.

E. Preparación de la mezcla de semillas.

Una vez que se tienen los cálculos para cada especie, pueden comenzar las actividades para mezclar las semillas. El objetivo de estas actividades es colocar las mezclas de las semillas en paquetes organizados, fáciles de manejar, y listo para usarse. Las actividades para elaborar la mezcla de semillas incluyen pesar las semillas de cada especie, mezclar los lotes de semillas, colocar las semillas en bolsas y etiquetarlas. La bolsa de semillas se convierte en una unidad básica.

F. Determinar la fecha de siembra.

La mejor fecha para sembrar varía por sitio y especies. El mejor momento para sembrar es cuando el suelo se encuentra húmedo, está condición se presenta a principios de la estación lluviosa (junio-julio), para aprovechar la mayor cantidad de precipitación.

G. Asegurar la calidad.

Existen varios factores que se pueden monitorear durante la siembra, para asegurarse de que las actividades son administradas correctamente. La profundidad de las semillas colocadas, uniformidad en la aplicación, densidades de siembra y manipulación de semillas, deberían ser monitoreadas. Es importante medir periódicamente la profundidad de las semillas, especialmente al comienzo de las actividades o cuando un nuevo sitio está siendo sembrado.

3.4.1.1 Tipos de siembra

Los tipos de siembra más recomendados se describen a continuación.

A. *Hidrosiembra.*

Es un método en el que las semillas, estabilizadores y enmiendas se aplican hidráulicamente al suelo con la finalidad de revegetar. Con el fin de reducir la erosión laminar, la formación de canalillos y pequeñas cárcavas, además de dar estabilidad para reducir riesgo de derrumbes, la aplicación de hidrosiembra en taludes es una técnica eficiente en la revegetación, el control de la erosión y la estabilización de cortes y rellenos de caminos. Se puede aplicar en áreas con pendiente pronunciada, y en la superficie de los taludes de manera homogénea. Por medio de esta técnica se colocan semillas viables en una superficie con las condiciones ambientales para germinar y producir plantas que tendrán la función de estabilizar el suelo. El equipo de hidrosiembra está compuesto por un tanque que contiene agua con un fijador, semillas, enmiendas del suelo, fertilizantes, productos estabilizadores, una bomba a alta presión, una manguera y una boquilla. Conforme el tamaño de los tanques aumenta la velocidad y la operación mejora. Los ingredientes de la hidrosiembra deberán seleccionarse minuciosamente antes de la aplicación para que la cobertura de semillas sea homogénea. Un problema con esta técnica es que las semillas pueden dañarse con los agitadores de las bombas, puede ocurrir una germinación precoz ocasionada por la hidratación y además se requieren grandes cantidades de agua para su aplicación.

Las siguientes fotografías muestran ejemplos de la ejecución de la hidrosiembra.

Figura 59
Ejemplo de aplicación de hidrosiembra.



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

B. *Siembra en bancos semilleros.*

Un banco semillero es un saco de tela de henequén relleno de aserrín, arena de río, estiércol, hojarasca de pino, semillas de herbáceas y pastos nativos, distribuido en “Tres bolillo” p. ej. taludes de corte y relleno (Kerkus, 2013). Los beneficios de esta actividad principalmente se encaminan en el favorecimiento de la revegetación en los taludes de cortes, así como su estabilización, la disminución de los escurrimientos y para el control de la erosión hídrica.

Los bancos semilleros se establecen sobre taludes de corte y relleno, preferentemente al inicio de la temporada de lluvias para promover la germinación de las semillas. Las

especies utilizadas para los bancos semilleros, deberán ser de rápido enraizamiento y crecimiento, resistentes a la sequía, de fácil propagación, generadoras de materia orgánica y adaptadas a las condiciones climáticas locales. El sustrato que complementa los bancos semilleros puede variar de acuerdo con los materiales que se puedan encontrar en cada localidad, sin embargo se pueden considerar vega de río, aserrín, excremento de ganado, hojarasca o corteza vegetal. La mezcla de sustratos se lleva a cabo con cuidado sin destruir la estructura física de los componentes. Una mezcla recomendada contiene 40% de vega de río, 40% de aserrín y 20% de estiércol de chivo y hojarasca de pino. Previamente la mezcla de los sustratos se hace manualmente con el uso de palas.

Figura 60
Ejemplo de aplicación de bancos semilleros.



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

Los bancos semilleros son de tela de henequén de 20 x 40 cm, se cosen con aguja de arrea e hilo de fibra natural, dejando un costado abierto para la posterior incorporación del sustrato y la semillas. Cada banco semillero es llenado con el sustrato previamente mezclado y con la mezcla de especies vegetales, se colocan a no más de 5 cm de profundidad, el peso aproximado de cada banco es de 2 kg. La colocación de los bancos semilleros en el talud se lleva a cabo con varillas de 3/8 y 25 cm de largo sobre el talud sin malla, y con alambre cocido en taludes con malla triple torsión. Los bancos semilleros se establecen en un diseño “Tres bolillo”, arreglo que permite la formación de triángulos equiláteros, a una distancia de 1 m entre cada uno de ellos.

Las siguientes fotografías muestran ejemplos de la colocación de los bancos semilleros.

C. Siembra al voleo.

La siembra al voleo es una técnica básica en el proceso de recuperación de suelo, mediante su aplicación se

busca inducir vegetación herbácea para reducir el efecto erosivo del agua de lluvia y viento mediante la incorporación de semillas del estrato herbáceo propias de cada sitio.

Esta actividad se acompaña de otras obras para combatir los procesos erosivos que atenúan áreas desprovistas de vegetación y que pueden formar con el paso del tiempo canaletas y cárcavas menores, de no remediarse pueden derivar en zanjas y derrumbes de diferentes dimensiones de materiales edáficos. Esta acción se puede hacer en terrenos sin vegetación y áreas afectadas por las actividades de construcción de las obras de cada proyecto, como caminos de acceso, patios de maniobra y bodegas temporales entre otros. Las técnicas empleadas en conjunto con la siembra al voleo y otras complementarias (afine de talud, empalizadas y muros de piedra, entre otras), estabilizan el suelo para que tenga capacidad de soportar la vegetación que se establezca de forma inducida (siembra) o por regeneración natural (sucesión ecológica).

El procedimiento se inicia con el cernido del suelo producto del despalme, la colecta de semilla en temporada de estiaje, su almacenaje, su tratamiento germinativo, la mezcla del suelo con sustrato orgánico, rastreo ligero del sitio, humedecimiento del sitio, siembra de semilla, extendido de la mezcla, incorporación de fertilizante y riego de asentamiento (en caso de siembra en temporada de estiaje). Las herramientas menores que se pueden emplear son carretilla, azadón, pala y rastrillo, así como una pipa de agua, semillas (gramíneas) y fertilizante (Kerkus, 2020).

Las siguientes fotografías muestran ejemplos de la siembra al voleo.

Figura 61
Ejemplo de siembra al voleo.





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

3.4.2 Métodos de plantación

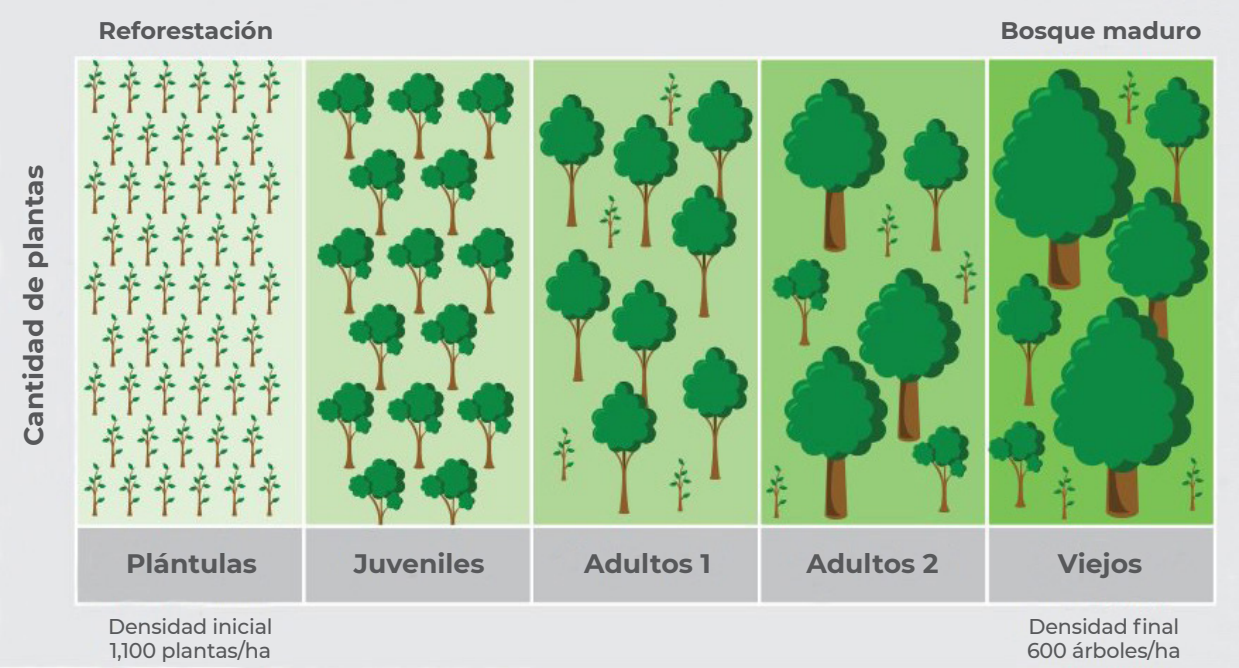
La plantación radica en establecer una planta en el suelo, que ya ha pasado por un proceso de reproducción ya sea sexual o asexual.

3.4.2.1 Diseño de plantación

En este parte del proceso se determina en qué punto del terreno se van a plantar los individuos vegetales de acuerdo con las diferentes condiciones topográficas del mismo.

Es importante considerar que la distancia entre planta y planta dependerá del espaciamiento que la especie demande al ser adulta, tomando en cuenta que en sus etapas juveniles la plantación debe tener por lo menos el doble de densidad que cuando es adulta. En la siguiente Figura se esquematiza el estado de sucesión de una reforestación, hasta que los ejemplares establecidos alcanzan una madurez.

Figura 62
Sucesión de una reforestación hasta la formación de un bosque maduro.



Sucesión de una reforestación hasta la formación de un bosque maduro.

Fuente: ***https://twitter.com/CONAFOR/status/900085952927989760/photo/1***

Para definir la densidad de la plantación, en México existen reglas que se basan en el tipo general de comunidad vegetal, por ejemplo, el programa denominado ProÁrbol 2010 en sus reglas de operación estableció la densidad promedio por tipo de ecosistema, misma que se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 36
Densidad de reforestación por hectárea

Tipo	Ecosistema (densidad por hectárea)			
	Bosques de coníferas	Selvas medianas y altas	Selvas bajas	Zonas áridas y semiáridas
Con planta	Máximo 1,600 Mínimo 1,100	Máximo 900 Mínimo 625	Máximo 900 Mínimo 625	Máximo 2000 Mínimo 800
Con material vegetativo	No aplica	No aplica	No aplica	Máximo 4000 Mínimo 1100

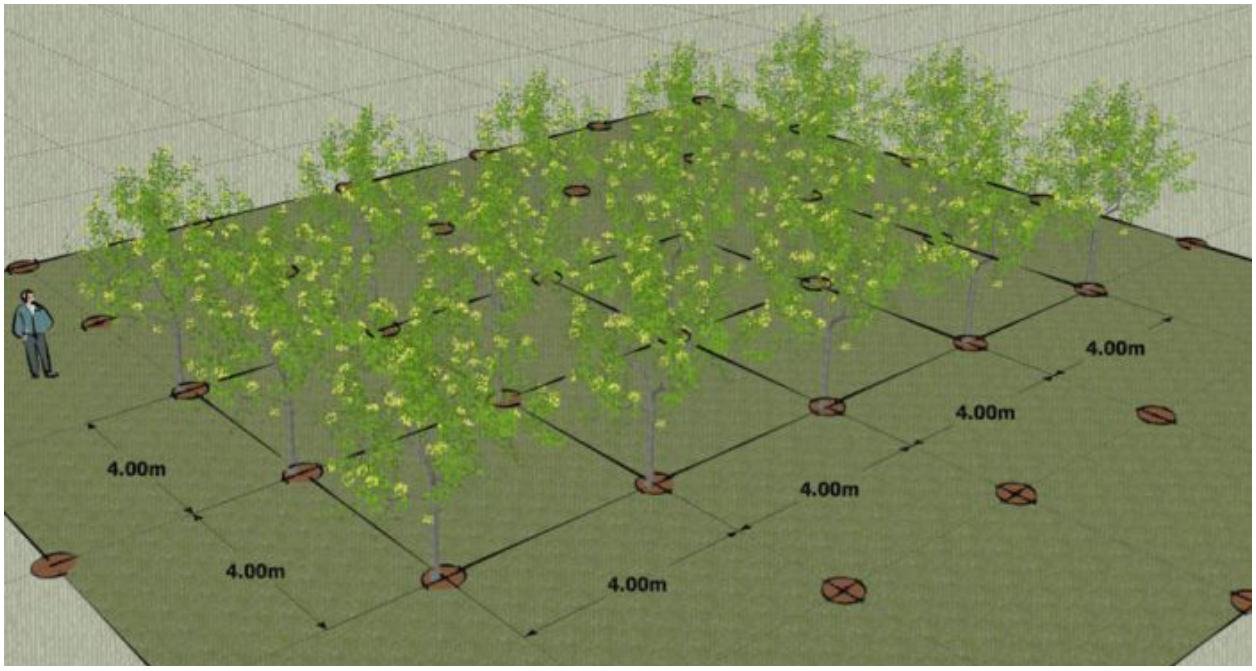
Fuente: modificado de CONAFOR, 2009.

Cuando se define la densidad de plantación se puede proceder a la definición del diseño de plantación. Aunque existen varios tipos, entre los más usados y recomendados tenemos dos tipos: marco real y tresbolillo.

A. Plantación en "Marco real".

En el marco real las plantas, una vez colocadas en el terreno, ocupan cada una el vértice del ángulo de un cuadrado, por lo que la distancia entre plantas y entre las filas formadas, siempre es la misma, o sea, la del marco elegido. Este sistema permite el paso de la maquinaria, en dos direcciones perpendiculares, entre filas y entre plantas, el esquema representativo se ilustra a continuación.

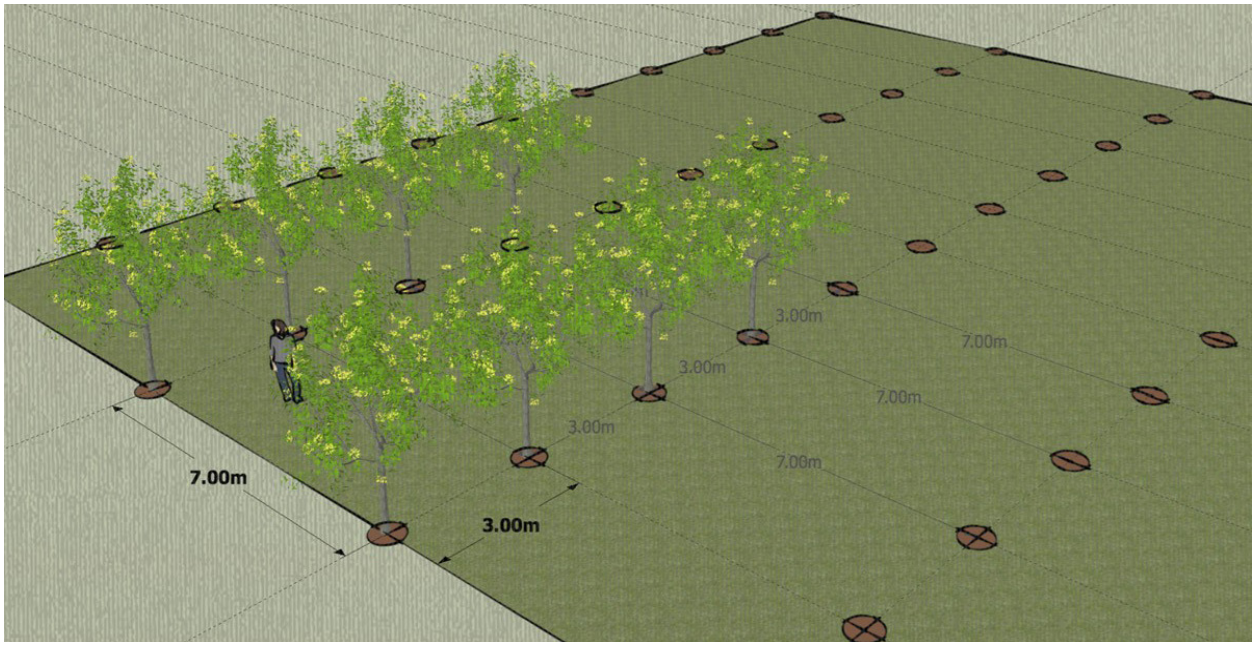
Figura 63
Marco real cuadrado.



Fuente: ***https://www.permacultura.org.mx/images/herramientas/marqueo_plantacion_real.jpg***

Otra variación del marco real es en forma de rectángulo, en el que cada planta está situada en el vértice de un rectángulo. Este es el sistema que se está imponiendo en la actualidad. Las labores se realizan en sistema de calle, donde las plantas ocupan en el terreno, cada uno de los vértices de los ángulos de un cuadrilátero rectángulo. El lado menor de este rectángulo es lo que se denomina "distancia entre plantas"; el mayor, "distancia entre filas", que son, evidentemente, distintas. A continuación se presenta un esquema representativo de este diseño de plantación.

Figura 64
Marco real rectagular.



Fuente: ***https://www.permacultura.org.mx/images/herramientas/marqueo_plantacion_calles.jpg***

Este tipo de diseño de plantación se recomienda utilizarlo en terrenos planos o con pendientes menores a 20% (CONAFOR, 2010), y para calcular la cantidad de plantas que se establecerán por hectárea se utilizan dos fórmulas dependiendo de si se opta por un trazo cuadrangular o rectangular. Para el trazo cuadrangular la fórmula es:

$$No.\ Plantas/ha = 10{,}000\ m^2/D^2$$

Donde:

D = distancia entre cada árbol.

Este sistema de plantación se puede ajustar a áreas muy estrechas, pero con una longitud mayor como puede ser un derecho de vía de infraestructura carretera y vía férrea.

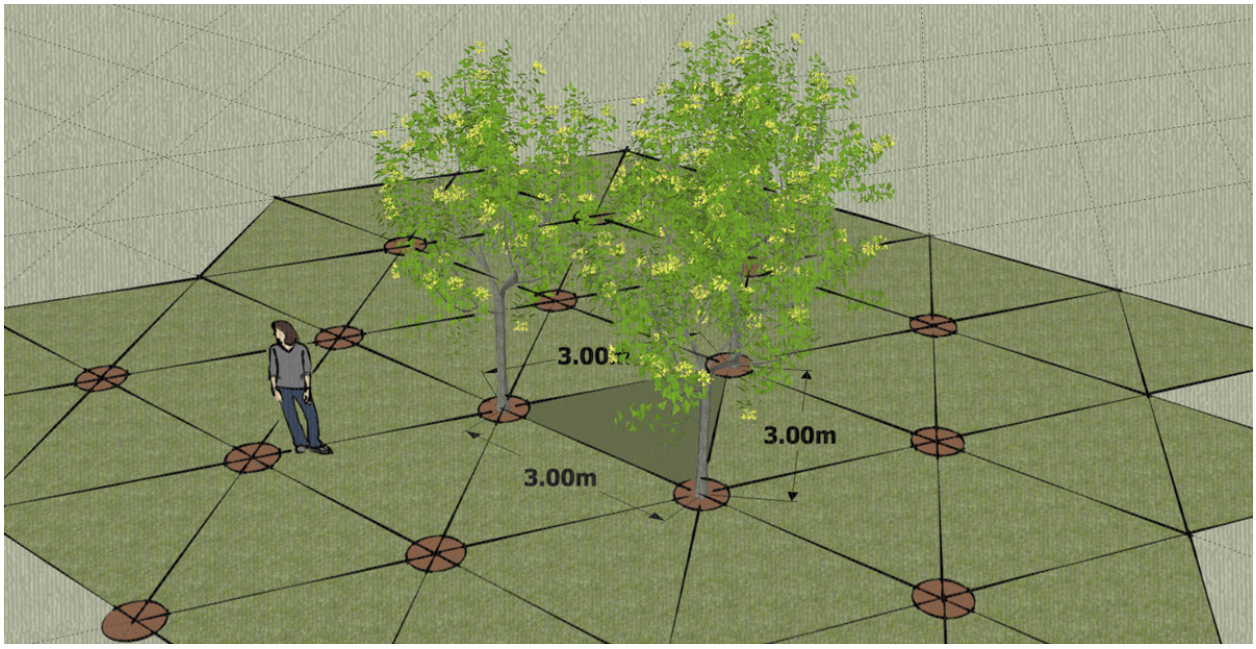
B. Plantación en "Tresbolillo".

Otra forma de trazo bastante utilizada en las reforestaciones es el tresbolillo, donde las plantas ocupan en el terreno cada uno de los vértices de un triángulo equilátero, guardando siempre la misma distancia entre plantas que entre filas. CONAFOR lo recomienda tanto para pendientes mayores a 20% como para terrenos planos y es muy utilizado ya que las líneas de plantación son acordes con las curvas de nivel del terreno

y se aprovechan los escurrimientos a la vez que se disminuye la erosión edáfica. De igual manera se puede emplear en sitios angostos (en derechos de vía) donde quepan dos o más filas de árboles. La distribución de la tierra es óptima con este sistema, pero en ocasiones se complican las labores.

En la siguiente Figura se presenta un esquema representativo de la forma de acomodar las plantas utilizando el diseño de plantación "tres bolillo".

Figura 65
Diseño tresbolillo.



Fuente: https://www.permacultura.org.mx/es/herramientas/formulario/tresbolillo/

De acuerdo con el espacio requerido entre las plantas se puede obtener el espacio necesario entre las hileras en el diseño tresbolillo y con ello establecer la densidad de plantas por ha.

Tabla 37
Densidad de plantación de acuerdo con la distancia entre plantas en el trazo tresbolillo.

Distancia entre plantas (m)	Distancia entre hileras (m)	Plantas/ha
2	1.732	2,500
2.5	2.165	1,600
3	2.598	1,111
3.5	3.031	816
4	3.464	625
4.5	3.897	494
5	4.33	400

Fuente: CONAFOR, 2010.

Entre las ventajas de este sistema se encuentran:

- El número de plantas que cabe por unidad de superficie es mayor que en cualquier otro sistema regular, siendo la diferencia cada vez mayor si es más estrecha la distancia del sistema elegido.
- Es apropiado para plantaciones intensivas.
- Permite dar las labores de cultivo en tres direcciones, con lo cual la tierra queda mejor trabajada y disminuye el riesgo de erosión.

Entre los inconvenientes que presenta este sistema, es que el marqueo es más complicado y la mecanización y mantenimiento es más dificultoso. Sin embargo, una vez realizada la plantación es muy vistosa por lo que con frecuencia es el sistema preferido para realizar reforestaciones.

C. Plantación por cavidades.

Cuando las cepas son rellenadas con medios de crecimiento (suelo orgánico o subsuelo mejorados) son diseñadas para tener una profundidad adecuada de suelo y buena capacidad de retención de agua, de forma que el agua que escurre por la ladera es interceptada y almacenada para quedar disponible para las plantas. La superficie de las cepas suele cubrirse con un acolchado para proteger a la superficie de la erosión.

Por otra parte, existen las laderas de microcaptación, que son estructuras que capturan la escorrentía proveniente de la parte alta de los cortes y de hombros compactos en terrazas y bermas, y puede ser utilizada para el crecimiento de las plantas. La microcaptación incluye cuencas de almacenamiento y bermas. Las bermas generalmente son obstáculos de 10 a 20 cm de alto. Están formadas por suelo, residuos de madera o productos manufacturados como la composta. Los productos manufacturados y los residuos de madera son parcialmente enterrados en la superficie del suelo para evitar que el agua erosione bajo la estructura. Las bermas de composta son montículos continuos de composta que pueden disminuir la velocidad del agua y filtrar sedimentos. Las plantas pueden establecerse inmediatamente arriba de las bermas u obstáculos, para que las raíces puedan acceder al agua que se capture.

D. Plantación en islas de revegetación.

Las islas se emplean donde los recursos, tales como el suelo y las enmiendas orgánicas, están limitadas. Se emplean en proyectos como caminos que quedan en desuso, corredores biológicos, bancos de tiro y otras áreas altamente perturbadas. La estrategia detrás de las islas es crear áreas con condiciones ambientales ideales para el crecimiento de las plantas y que replica las condiciones topográficas naturales y la distribución de la vegetación local. A continuación se presenta un ejemplo de cómo se debe establecer una isla de revegetación.

Figura 66
Diseño de plantación con el método de agregación en islas, empleado en proyectos de restauración y recuperación ecológica.



Fuente: U.S. Department of Transportation (2017).

Las islas pueden crearse excavando a una profundidad de por lo menos 60 cm y rellenando el espacio con suelo orgánico, composta o alguna otra enmienda (p. ej. biocarbón, fertilizantes), incluyendo mezclas de enmiendas con suelo. Después de la plantación puede aplicarse algún acolchado en la superficie de la isla. Generalmente una plantación con la técnica de islas ocupa entre un cuarto o un tercio del área a revegetar. Los espacios que se distribuyen entre las islas son de menor calidad que las islas, por ello sirven para el desarrollo de pastos y hierbas.

3.4.2.2 Trazado y marqueo de la plantación

El trazado de la plantación tendrá que realizarse en apego al diseño de plantación que se haya seleccionado, pudiendo ser en marco real o tres bolillo, tal como se mencionó en apartados anteriores. Es importante considerar la topografía del terreno para las actividades del trazado, ya que si la revegetación se desarrollará en un terreno con pendiente prolongada se tendrá que definir si la marcación se realizará considerando las curvas a nivel del terreno o si se contempla la compensación de pendiente para la longitud. En la siguiente Figura se observa la marcación de una plantación a tresbolillo.

Figura 67
Trazo de la plantación.



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

En lo que respecta a las actividades de marcación, éstas pueden realizarse mediante la colocación de estacas o dejar marcas con cal en cada punto donde se pretenda colocar una planta, tal como se observa en la siguiente Figura.

Figura 68
Marcaje de plantación (colocación de estacas).



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

3.4.2.3 Mejoradores del suelo y/o fertilizantes

El mejorador de suelo, como su nombre lo indica, es la adición de material, elemento o compuesto químico u orgánico en el sitio donde se instalará cualquier cultivo con la intención de incrementar las condiciones físicas, catalizar los procesos químicos y biológicos o adicionar nutrientes que no se encuentran o están en muy pequeñas cantidades en el sitio.

Un primer mejorador de suelo que se utiliza es la adición inversa de la primera capa de suelo (más fértil) que se excavó al momento de abrir la cepa. Esta capa se coloca en el fondo a manera de tendido que recibirá el cepellón y el sistema radicular apical.

Otros mejoradores de origen natural pueden ser aquellos de origen animal (composta y abono) o vegetal (*mulch*, aserrín, viruta, entre otros) o una combinación de ambos. Dependiendo de las características físicas y químicas del suelo es la cantidad y tipo de mejorador del suelo que se puede aplicar previamente a la plantación y/o durante los primeros meses de instalada la revegetación.

Para adicionar un mejorador químico es necesario conocer las fichas técnicas de cada uno de los productos comerciales, ya que existe el riesgo que se añadan compuestos que no sean compatibles con las especies plantadas o que simplemente no se activen y se pierda su efectividad.

Por otro lado, existen otros mejoradores de suelo de origen orgánico a base de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos (Olinka, 2020).

Al aplicarse algún mejorador de suelo se modifica y mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo dando una mayor disponibilidad de los micronutrimentos que están presentes en éste, así como los que se aplican en la fertiirrigación en forma de sulfatos y/o quelatos. Algunos mejoradores se pueden aplicar durante todo el ciclo de cultivo y es recomendable aplicarlo junto con quelatos para que su efecto sea más prolongado (Olinka, 2020).

La aportación de ácidos húmicos y fúlvicos al suelo mejoran de manera orgánica las propiedades físicas, químicas y biológicas del sitio en el que se aplique; reestableciendo el equilibrio órgano-mineral perdido por una sobrefertilización. Este equilibrio se describe como el resultado de un aumento en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, que ayuda a aumentar la eficiencia de los fertilizantes químicos aplicados, reduciendo así el uso de éstos sin que se perjudique los rendimientos de los cultivos.

La aportación del mejorador del suelo actúa directamente sobre la estructura del suelo, físicamente lo hace más esponjoso ya que aumenta el porcentaje de aire lo que permite a las raíces un mayor acceso al O_2 dando como resultado un mayor crecimiento radicular y una mayor absorción nutrimental por las raíces. También aumenta la absorción radicular ya que favorece el aumento de diámetro en los canales iónicos de la membrana de la pared celular.

Los ácidos húmicos (HAs) fácilmente forman sales con elementos “minerales traza inorgánicos” que se encuentran en muchos suelos pero que las plantas no pueden absorberlos fácilmente (Olinka, 2020b).

Un análisis de los extractos de HAs revela la presencia de más de 60 elementos minerales diferentes. Estos elementos traza están unidos a las moléculas de HAs en una forma que puede usarse fácilmente por varios organismos vivos. Como resultado, la

función de HAs es tan importante como los sistemas de intercambio de iones y sistemas de metales complejos (quelante).

El agua disponible es sin duda el componente más importante de la fertilidad del suelo. Suelos que contienen altas concentraciones de sustancias húmicas contienen agua para el uso de cultivos para los periodos de sequía. Los productores interesados en la limpieza de sus suelos (presencia de pesticidas tóxicos) pueden acelerar la degradación de toxinas aplicando sustancias húmicas.

Los Ácidos fúlvicos (FAs) tienen un contenido de oxígeno dos veces mayor que el de los HAs (Olinka, 2020a).

Un mejorador orgánico líquido soluble en agua tiene un alto contenido de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, el cual está conformado principalmente con ácidos fúlvicos y otros químicamente activos que actúan en conjunto con los ácidos polihidroxicarboxílicos para completar los nutrimentos que no se encuentran disponibles en el suelo.

Por el tamaño tan pequeño que tienen las moléculas de FA, pueden entrar rápidamente a las raíces de plantas, tallos y hojas. Mientras entran a estas plantas llevan minerales traza de la planta a la superficie de los tejidos de la planta.

Los FAs son un ingrediente clave de fertilizantes foliares de alta calidad. Algunos rociadores foliares contienen minerales quelatos FAs, que, en estados específicos del crecimiento de la planta, pueden ser usados como una técnica de producción primaria para maximizar la capacidad productiva de la planta. Una vez aplicado al follaje de la planta, los FAs transportan minerales traza directamente a lugares metabólicos en las células de la planta. Los FAs son el compuesto quelante que contiene carbón, el elemento conocido más efectivo que cumple esta función.

En conclusión, la adición de ácidos orgánicos como mejorador de suelo tienen como función mejorar la adsorción de nutrimientos en las partículas de suelo poniéndolos disponibles para una rápida absorción radicular

3.4.2.4 Apertura de cepas

La apertura de las cepas consiste en hacer excavaciones en el suelo previamente ya marcado. La NADF-006-RNAT-2016 establece que la apertura de la cepa debe ser de 40 a 60 cm más amplia que el cepellón que contiene el sistema radicular de la planta a reforestar.

Para terrenos duros y muy compactos, una referencia adecuada que puede emplearse en el tamaño de la cepa es del doble del cepellón, y para terrenos blandos y poco compactados, se puede abrir la cepa a 1/3 más del tamaño del cepellón; con la finalidad de facilitar la adaptación del sistema radicular y afianzar al suelo original.

El material excavado debe separarse en dos partes, la primera mitad excavada contiene una mayor cantidad de materia orgánica y otros nutrientes (aunque el suelo en general sea muy escaso), es decir, contiene tierra más fértil y la segunda mitad que es la más profunda y se acerca más a la roca principal, es tierra menos fértil.

Las herramientas por utilizar pueden ser mecánicas (sembradoras automáticas) o manuales, entre las más empleadas están las palas plantadoras, los cavahoyos, las barretas y los picos.

Figura 69
Ejemplo de apertura de cepa separando en dos la excavación (izquierda) y herramientas manuales empleadas para abrir cepas (derecha).



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

3.4.2.5 Transporte de la planta a los sitios de revegetación

El transporte de la planta desde el vivero al lugar de la revegetación debe hacerse con mucho cuidado para evitar daños al tallo y a la raíz de las plantas, así como al envase de éstas. Para prevenir posibles daños se recomienda seguir las siguientes indicaciones:

- Considerar que las distancias del vivero al área de plantación sean cortas, evitando traslados mayores a 100 kilómetros (CONAFOR, 2010). Se ha visto que las plantas con tamaños menores a 1.5 m se estresan en recorridos mayores a 50 km.
- Para el traslado de la planta se deberá elegir una hora y velocidad adecuada para evitar que las plantas sean expuestas al sol y a corrientes de aire. Durante el traslado se deben evitar movimientos bruscos (CONAFOR, 2010). Lo recomendable es programar los recorridos para que la hora de llegada al sitio sea antes de las 10:00 h o después de las 16:00 h. Además, es factible humedecer excesivamente el cepellón de cada contenedor para disminuir el estrés hídrico y el exceso de calor generado durante el viaje.

- Transportar la cantidad óptima de planta por viaje de acuerdo con las características del vehículo de transporte, sin sobrecargarlo para evitar daños. Se debe proteger la carga con malla sombra encima de la estructura del camión (CONAFOR, 2010). El calibre de malla sombra recomendable es mínimo del 75 % y si se usa lona u otro similar se debe asegurar la ventilación en todo momento.
- No encimar las charolas o contenedores uno con otro, ni colocar objetos sobre las plantas. La forma correcta de transportar es hacer estibas en forma piramidal procurando que los bordes de los contenedores no estropeen los tallos principales, de esta forma se asegura que en el traslado no haya espacio para su movimiento y se dañen severamente.
- La descarga se hará en un lugar plano, teniendo cuidado con los movimientos bruscos que pudieran originar pérdida de la tierra del cepellón. Se hace en el sitio más cercano posible al área de plantación (de contar con acceso) o en un sitio estratégico. Ahí se encargan nuevamente de acercar planta por planta hasta la cepa.
- Al hacer la distribución en el terreno se toman los contenedores por las orillas, nunca del tallo de la planta. En sistema tradicional se toma del envase, jamás del tallo.

En el caso de especies caducifolias hay que considerar la posibilidad de que las hojas se pueden caer, sin embargo, esto no debe preocupar siempre y cuando las ramas no resulten dañadas. Para las especies perennes se debe tener cuidado que el tallo no se lesione.

Con las palmeras y algunas cactáceas se debe tener especial cuidado de no dañar la parte apical por lo que se sugiere que las pencas u hojas más avejentadas si no presentan algún daño o enfermedad grave no sean podadas hasta después de su plantación en el sitio final ya que sirven como protección al meristemo. En el caso de otras cactáceas, entre ellas los nopales y columnares, es factible su transporte con un solo cladodio o penca principal, ya que con el movimiento del transporte pueden sufrir daños severos.

Figura 70
Transporte de planta a sitios a revegetar.



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

3.4.2.6 Establecimiento de la plantación

La plantación puede realizarse con diferentes técnicas, según las herramientas, el tipo de planta, los recursos y el personal disponible.

Previo a la plantación se debe considerar la aplicación de acrilato de potasio biodegradable o “silos de agua”, que es un polímero capaz de absorber hasta 500 veces su peso en agua. Acción que tiene el objetivo de generar una reserva hídrica disponible para que la planta la aproveche si se presenta una etapa seca durante el proceso de adaptación a las condiciones del sitio.

La forma más eficiente de colocar esta sustancia es intercalando pequeñas cantidades a medida que se va plantando y llenando de tierra toda la cepa para que se encuentre bien distribuida (Kerkus, 2019). Durante este proceso se puede aplicar distintos mejoradores de suelo o fertilizantes naturales o artificiales, pero esto dependerá de las especificaciones técnicas de cada producto.

Figura 71
Incorporación de silos de agua a la pared interna de la cepa.



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

A continuación se describen algunas técnicas de plantación.

A. Sistema de cepa común.

Consiste en utilizar las cepas antes aperturadas para la plantación de los ejemplares, una cepa por individuo, recomendando tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Previo a la colocación de la planta en la cepa, se recomienda hacer una poda de raíz si ésta es necesaria, recortando las puntas para evitar que se doblen y crezcan hacia arriba o en forma circular. Si se poda la raíz es necesario podar un poco el follaje lateral para compensar la pérdida de raíces y evitar la deshidratación de la planta en tanto se arraiga en el terreno.
- Se quita el envase sin dañar la raíz (retirando el envase de plástico de la planta).
- Antes de colocar el árbol en la cepa, se agrega la tierra superficial (más fértil) para que la planta tenga mejor disposición de nutrientes.

- Después de haber colocado la planta, se rellena con tierra más profunda y se compacta de tal forma que no quede tan fuerte para permitir la aireación y drenaje en el suelo.
- Se recomienda apisonar ligeramente el suelo para que no queden espacios de aire en la cepa y evitar la deshidratación de la raíz de la planta, ya que desde su extracción del vivero hasta la plantación está sujeta al estrés físico por el traslado.

Este método es el más recomendado para realizar plantaciones exitosas.

B. Golpe o pico de pala.

Consiste en aperturar el suelo de un solo golpe, con pala o pico, creando un espacio suficiente para colocar la raíz de la planta. Se utiliza de preferencia planta con raíz desnuda y últimamente se ha utilizado para planta producida en contenedor de plástico rígido o polietileno. Este método es aplicable en aquellos terrenos manejables y no pedregosos.

Cuando el suelo está muy compactado y el sitio a revegetar está ubicado en terrenos muy accidentados, la apertura de las cepas se puede hacer con la ayuda de una ahoyadora.

3.4.2.7 Construcción de cajetes y colocación de tutores

Con el suelo restante de la apertura de la cepa, los últimos 20 cm excavados, se forma un cajete alrededor de la base del tallo del árbol, de un diámetro mínimo sugerido de 100 cm y una profundidad de 10-15 cm en su parte más profunda, se debe tener cuidado que el árbol no quede en la zona más profunda del cajete ya que existe el riesgo de saturar de agua el tallo lo que puede traer complicaciones patológicas inmediatas.

En terrenos con pendientes mayores al 15% sería necesario romper “aguas arriba” de la planta recién instalada el suelo para conformarlo “aguas abajo” y así mantener la forma circular; aunque en ocasiones es adecuado hacer solamente medio cajete comúnmente llamados en media luna para no propiciar factores erosivos

La conformación del cajete favorece la captación de agua de lluvia o de riego de mantenimiento es por ello por lo que durante su elaboración se eliminan hierbas que pudieran generar competencia por agua y nutrientes con el árbol recién establecido.

El borde del cajete preferentemente debe ser discreto con respecto al material edáfico cercano al árbol, es decir, debe estar bien definido y procurar que no tenga aperturas que puedan provocar escorrentías y haya pérdida de suelo por erosión laminar, también se pueden ocupar piedras para que le den soporte al borde del cajete. Esta actividad se realizará con azadón o pala, como se observa en las siguientes fotografías.

Figura 72
Ejemplos de la conformación de cajetes en varios tipos de suelo.



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

Para dar sujeción, guiar y estimular el crecimiento vertical del tallo se instala un tutor. El plantador debe velar porque el tutor no dañe la parte radicular de las plantas, para ello se debe instalar el tutor a una distancia de al menos 5 cm, desde el fuste de la planta (Seremi de Medio Ambiente Región del Biobío, 2020).

La colocación del tutor se realiza posteriormente al plantado, con la finalidad de brindar apoyo al tallo y evitar que se mueva, debido a que todavía no se han establecido sus raíces en el nuevo sitio.

Los tutores se sitúan después de haber apisonado bien la tierra que se usó para el cierre de la cepa. A la estaca de madera se ata el tallo, en por lo menos dos puntos con rafia, los nudos deben ser sueltos para que el tronco se pueda expandir y son en forma de “ocho horizontal” (Kerkus, 2019).

En cada proceso y con cada herramienta usada para desarrollar las acciones se debe evitar en todo momento y a cualquier costo causar algún daño superficial o profundo a cualquier estructura principal de la planta, ya que se pone en riesgo la sobrevivencia de los árboles. A continuación se ejemplifica la forma de colocar los tutores a los ejemplares plantados.

Figura 73
Ejemplos de colocación de tutor.



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

3.5 Marcación y georreferenciación de la revegetación

Una vez establecida la revegetación, es recomendable que a cada ejemplar plantado se le coloque una etiqueta de plástico o de cualquier otro material que soporte las diferentes condiciones del clima, esto para que se le asigne un número de identificación a cada planta. Esta información tendrá que quedar registrada en la bitácora de plantación para que en las actividades de mantenimiento y monitoreo se tenga un control de los ejemplares establecidos.

Figura 74
Etiquetado de individuos plantados.



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

Considerando la superficie revegetada y el número de plantas establecidas se recomienda que cada ejemplar sea georreferenciado, esto para enriquecer la información de la bitácora de plantación y en visitas posteriores se facilite la ubicación de ciertos ejemplares si es que representan importancia para ser verificadas constantemente.

3.6 Riego de asentamiento

Como ya se ha venido mencionando en numerales anteriores, para realizar la revegetación o cualquier otra acción ambiental que integre la instalación de especies vegetales en un sitio determinada, la época más idónea para llevarlo a cabo es durante las lluvias, dependiendo la región en la que se encuentre, pueden variar en cuanto a duración e intensidad, pero por lo general se presentan durante los meses de junio a octubre.

Sin embargo, puede existir el riesgo que las lluvias se retrasen o que el periodo de reforestación no sea durante las lluvias o que en la región no se registren abundantes lluvias, para ello se debe contemplar la aplicación del riego de asentamiento.

Entiéndase a este riego como a la primera aplicación de agua después de haber realizado la revegetación, en esta actividad se debe asegurar que el sustrato y suelo que alberga al individuo forestado o revegetado tenga suficiente humedad al menos los primeros 25 cm de profundidad (Protección de la Fauna Mexicana, A. C. [Profauna]). Es importante considerar que, dependiendo de las especies plantadas y la cantidad de silos de agua aplicados durante la plantación, será la cantidad de agua requerida en riegos subsecuentes, para tener una referencia se puede aplicar por cada centímetro de diámetro aproximadamente entre 20-50 litros por individuo, dependiendo del tamaño del individuo (CRISARA, 2017; Urna Bios, 2019).

La forma de aplicar este riego debe ser lenta para asegurar que el agua acceda lo más profundamente hacia las raíces, lo más recomendable es ir dosificando la caída de agua mediante algún sistema de goteo que ralentice la salida de la manguera surtidora. Si no se llega a obtener ningún aditamento se debe de regular la presión de salida de agua y se debe colocar lo más cercano al piso para que no levante el sustrato y suelo recién removido. A continuación se ejemplifica la forma de aplicar el riego a individuos reforestados.

Figura 75
Ejemplo de aplicación de riego de asentamiento.



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

3.7 Bitácora de plantación

Una vez establecida la plantación o siembra, el encargado de la revegetación tendrá que realizar la apertura de una bitácora, en la cual se tendrá que indicar el número de individuos por especies plantados/sembrados y si las actividades desarrolladas son por medio de siembra tendrá que incluir la cantidad de semilla y la superficie de ocupación, esto con la finalidad de llevar un control de los ejemplares establecidos. De esta manera, cuando se realice el mantenimiento y el monitoreo se dará seguimiento a la revegetación por medio de las bitácoras.

En la siguiente Tabla se presenta un ejemplo de bitácora de campo para llevar a cabo el registro de la plantación y su posterior mantenimiento y monitoreo.

Tabla 38
Ejemplo de bitácora de campo para el registro de la plantación.

Logo empresa	BITÁCORA DE REVEGETACIÓN										Fecha: Revisión:
Fecha de preparación de la zona	Ubicación Coordenadas		Polígono o parcela	Superficie (m^2)	Especies utilizadas				Fecha de plantación	Recursos utilizados (humanos y materiales)	Observaciones
	X	Y			No. Individuos	Especie	Altura (m)	Diámetro tallo, diámetro copa (cm)			

COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

Capítulo 4
Conservación de sitios revegetados

Las labores de mantenimiento en los sitios revegetados tienen por objetivo cumplir con la salvaguarda y sobrevivencia en conjunto de la población arbórea, arbustiva o herbácea recién plantada y una buena práctica es realizarlo, al menos, durante los primeros 3 a 5 años de su desarrollo, no obstante, los periodos y la frecuencia del mantenimiento deberán establecerse por un especialista en la materia, en el periodo de planeación de la revegetación y acorde con un plan de trabajo previamente elaborado que considere el tiempo total durante el cual se realizarán las tareas de conservación y monitoreo (sobre este último se detalla más adelante en este Manual).

Es recomendable que las acciones de mantenimiento se realicen de manera continua, iniciando con un esfuerzo intensivo y que poco a poco se puede ir espaciando para aquellos sitios, árboles o zonas que presenten una buena adaptación. Se sugiere una frecuencia semestral una vez establecida la revegetación, considerando un acompañamiento que permita verificar cualquier riesgo que puede acaecer sobre la plantación.

Cumplir con los objetivos de una revegetación no es sencillo, porque en general las superficies de las áreas revegetadas instaladas como medidas de compensación por obras de infraestructura carretera se encuentran fraccionadas y quedan aisladas (entre sí) en diferentes polígonos, lo que resulta en una mayor longitud perimetral en colindancia con más predios que tienen otros fines (productivos o desarrollo) distintos al de conservación y compensación. Por lo tanto, en muchas ocasiones el realizar las actividades de revegetación en zonas distintas genera un costo mayor, gastos que al momento de realizar las propuestas no son considerados, dejando los proyectos de compensación muchas veces a la mitad de sus fases y dando lugar a que el éxito de las actividades planteadas no se vea reflejado.

Asimismo, las superficies revegetadas o reforestadas presentan una presión constante que se puede derivar en la pérdida de la sobrevivencia y en la salud general del arbolado. Esta presión muchas veces proviene de factores derivados de las actividades que se desarrollan desde la periferia de las superficies, pueden ser el pastoreo, incendios, vandalismo e invasión a los polígonos.

Para contrarrestar esta presión de origen antropogénico y además los factores naturales (biológicos, edáficos, climáticos, etc.) es necesario promover el desarrollo adecuado de las plantas, por ello se identifican acciones de mantenimiento básicas que se deben realizar con mayor esfuerzo dependiendo la época en la que se encuentre el periodo de ejecución de esta actividad. A continuación se listan algunas acciones para el mantenimiento.

Tabla 39
Acciones de mantenimiento recomendado por época.

Época	Presión	Acción de mantenimiento sugerida
Lluvias	Plagas, competencia natural de especies invasoras.	Reposición de arbolado muerto, reconformación de cajete, fertilización, deshierbe local.
Estiaje	Incendio, sequía.	Riego, reconformación de cajete y brechas individuales contra incendios, deshierbe extensivo, poda y aclareos.
Todo el año	Vandalismo, Invasión al polígono.	Cercado, corrección de tutor.

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

4.1 Seguimiento de la plantación mediante bitácora de mantenimiento

Tomando como base la bitácora abierta al momento de la plantación, al momento de realizar las actividades de mantenimiento se tendrá que anotar la fecha de intervención, las actividades desarrolladas, el número de ejemplares vivos y muertos, además de su estado fitosanitario, esto con la finalidad de proponer medidas correctivas como pueden ser la reposición de plantas muertas, el arreglo del cerco protector, de cajetes o la recomposición de tutores.

4.2 Riego

La aplicación del riego debe estar programada para efectuarse principalmente durante el periodo de estiaje, esto dependiendo de la región y tipo de vegetación que se esté conservando. La periodicidad del riego dependerá de las condiciones climáticas y edáficas que se presenten, con frecuencia las variables a considerar son precipitación, temperatura, humedad relativa, textura y tipo de suelo, entre otros (Kerkus, 2020).

Como ya se mencionó la forma de aplicar el riego debe ser lenta para asegurar que el agua acceda lo más profundamente hacia las raíces, se debe dosificar la caída de agua mediante algún sistema de goteo que ralentice la salida de la manguera surtidora o se debe regular la presión de salida de agua y colocarla lo más cercano al piso para que no levante el sustrato y suelo recién removido. En las Figuras que se presentan a continuación se observa la aplicación del riego de mantenimiento en áreas revegetadas.

Figura 76
Ejemplo de aplicación de riego por mantenimiento.





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

4.3 Deshierbe

Cuando termina la temporada de lluvias o por diferentes causas se termina o suspende el mantenimiento de los sitios revegetados, el estrato herbáceo, por sus características, crece más rápido que el estrato arbóreo, por ello es necesario realizar acciones de deshierbe enfocadas principalmente en disminuir la competencia natural que provocan estas especies por recursos (luz, humedad y nutrientes) y disminuir el riesgo de afectación por incendio.

Es importante realizar en dos etapas esta actividad, *i)* deshierbe localizado a la periferia de cada individuo arbóreo que consiste en eliminar hierbas en el espacio del cajete (radio aproximado de 60 a 100 cm) que ocasionan competencia. La herramienta adecuada para esta actividad es manual, machete o guadaña y *ii)* paulatinamente siguiendo las jornadas de mantenimiento, realizar el deshierbe general para disminuir la altura de las herbáceas descubriendo líneas de plantación hasta concluir con el deshierbe en todo el polígono. Las herramientas que se pueden usar además de las manuales pueden ser mecánicas como las desbrozadoras, en las siguientes Figuras se observa el deshierbe manual y mecánico de un sitio revegetado.

Figura 77
Ejemplo de deshierbe por mantenimiento.



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

4.4 Podas y aclareos

Para que la plantación se desarrolle óptimamente se puede aplicar la poda de formación que consiste en la eliminación de las ramas inferiores de ciertos árboles que presenten ramificaciones debajo de 1/3 del tallo principal y que muchas veces provoca que estas ramas sean más vigorosas que el resto del árbol. La herramienta más recomendable es el serrucho curvo para podas menores ya que se tiene mejor control de manera manual.

Figura 78
Ejemplo de poda de formación.



Fuente: Modificado de https://www.latiendadelagricultor.com

Esta práctica tiene el fin de incrementar la calidad de la madera y simplificar otras labores ya que facilita el acceso para tareas de mantenimiento. Además, reduce el riesgo de incendios (CONAFOR, 2010).

Por su parte el aclareo es otra actividad que mejora la calidad de la plantación y consiste en remover cierto número de árboles en determinada etapa de desarrollo de la plantación y propicia mejores condiciones de crecimiento con mayor calidad en el arbolado (CONAFOR, 2010). Sin embargo, para plantaciones de compensación ambiental esta actividad no es recomendable realizarla durante los primeros cinco años de establecida esta plantación por lo que se busca los mejores índices de sobrevivencia además que en ciertas áreas puede propiciar la regeneración natural.

4.5 Fertilización

Periódicamente es recomendable la incorporación de este compuesto u otros de origen orgánico para aportar de microelementos que pudieran no estar disponibles en el suelo que son necesarios para el desarrollo óptimo de la plantación.

Cuando los árboles se establecen en reforestación entran en un periodo de adaptación en la que requieren disponibilidad de nutrientes para un óptimo desarrollo foliar y radicular. La aplicación de fertilizantes de base inorgánica resulta de gran apoyo para este fin; en los individuos reforestados hay una mezcla muy efectiva, que es el fertilizante granulado Blaukorn 12-8-16+3Mg, se aplica de forma directa, en una dosis aproximada de 40 gr por individuo (Kerkus, 2020), preferentemente se debe aplicar entre tres y cuatro veces al año. A continuación se presenta un ejemplo de la aplicación de fertilizantes.

Figura 79
Ejemplo de aplicación de fertilizante en individuos establecidos en una revegetación.



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

4.6 Reconformación de cajetes

La reconformación del cajete sugiere la necesidad de asegurar que el agua de riego que se aplica periódicamente o de la lluvia se infiltre óptimamente hacia el sistema radicular de la planta.

El borde del cajete debe mantenerse discreto con un límite bien definido con respecto al resto de la superficie no debe tener aberturas provocadas por escorrentías que provoquen problemas de erosión laminar. Esta actividad se realizará con azadón o pala.

De manera complementaria a esta actividad para reforestaciones recién plantadas, durante la temporada de estiaje donde la materia vegetal es un buen combustible al quemarse es recomendable reconformar también la brecha individual cortafuego que ya se ha descrito anteriormente. En las siguientes imágenes se muestran actividades de mantenimiento de cajetes con brechas cortafuego.

Figura 80
Ejemplo de reconformación de cajetes con brechas cortafuego individual.



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

4.7 Corrección de tutores

Con el crecimiento paulatino de los árboles el tutor que se había colocado desde el proceso de plantación queda obsoleto y en ocasiones es contraproducente para el tallo principal, por ello frecuentemente se debe corregir el tutor y los nudos que lo sujetan al árbol, pues de no hacerlo puede provocar daño en las ramas, o en el follaje. En otras ocasiones el tutor puede no existir o bien, los nudos que lo ataban pueden ya no funcionar. En ese caso se corrige el tutor a los individuos que lo requieran, ya que éste tiene como función apoyar o sostener el peso de ramas y follaje, evitando su encamado o posición en el suelo, y también sirve para la identificación visual de la posición de los individuos. El tutor debe colocarse de manera perpendicular al suelo, haciendo dos amarres, uno cercano a la base y otro en la parte superior del tallo de los árboles (Kerkus, 2020). A continuación se ejemplifica cómo realizar la corrección de tutores.

Figura 81
Ejemplo de corrección de tutor en las labores por mantenimiento.



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

4.8 Conservación de cercado

Mediante las labores de mantenimiento se debe revisar periódicamente el perímetro de cada polígono de revegetación para registrar y evaluar las afectaciones potenciales que puedan acaecer sobre los árboles. En caso de presentarse una afectación al cercado se deben hacer las reparaciones pertinentes, para ello se analiza el daño total. Es necesario contar con clavos, grapas, postes, alambrado o con el material que fue constituido el cercado original para realizar su reposición y así mantener su funcionalidad.

4.9 Manejo de plagas y enfermedades

Como todo ser vivo, existen agentes patógenos que pueden afectar una o varias partes de los organismos forestados, y en muchas ocasiones estos agentes son más agresivos debido a alguna lesión o exposición del cambium vascular, tejido meristemático o radicular y que se puede derivar paulatinamente en la muerte del organismo. Al igual que con las plantas de vivero, en la revegetación es importante tener en cuenta un manejo integral de plagas y enfermedades que pueden acaecer sobre la plantación (CONAFOR, 2010), y teniendo esto en cuenta se pueden realizar diversas acciones de prevención y de corrección para revertir o disminuir sus efectos, tal como se muestra en la siguiente Tabla.

Tabla 40
Procedimiento del manejo integral de plagas y enfermedades forestales y sus medidas de control.

Manejo integral de plagas y enfermedades	Selección y aplicación de la estrategia de control	
	Medidas preventivas	Medidas de corrección
1. Planeación	Aislamiento	Remoción o destrucción manual
2. Prevención	Eliminación de hospederos	Control mecánico y físico
3. Monitoreo periódico de la plantación	Canales de drenaje	Tala de salvamento
4. Identificación de la plaga/enfermedad y daño		Poda sanitaria
5. Estudio de vida y hábitos de la plaga/ enfermedad		Raleo sanitario
6. Monitoreo poblacional de la plaga/enfermedad		Control etológico
7. Selección y aplicación de la estrategia de control		Control biológico
8. Evaluación de los tratamientos		Control químico

Fuente: CONAFOR, 2010.

4.9.1 Medidas preventivas

El manejo integrado de plagas y enfermedades en la revegetación inicia con la implementación de acciones que prevengan y eviten, en la medida de lo posible, la aparición de patógenos que afecten el buen desarrollo de ésta.

A. **Aislamiento:** consiste en delimitar con barreras físicas una o varias partes de la plantación con el fin de evitar la dispersión de la plaga o enfermedad, restringiendo el tráfico de personal y vehículos en esa área.
B. **Eliminación de hospederos alternos:** se trata de la eliminación de plantas dentro del sembradío y sus alrededores que pueden ser hospederas alternas de plagas o enfermedades.
C. **Canales de drenaje:** la construcción de canales de drenaje evita la anegación de las zonas bajas de la plantación, dificultando así el desarrollo de plagas o enfermedades.

4.9.2 Medidas de control

Una vez que se identifican las plagas o enfermedades que afectan a la plantación, se pueden emplear diversos métodos para su control y combate.

A. **Remoción y destrucción manual:** cuando se encuentre la presencia de insectos que pupen en ramas, corteza o suelo, es necesario hacer la remoción manual de las pupas y destruirlas en el sitio para cortar el ciclo del insecto.
B. **Control mecánico y físico:** incluye una serie de prácticas que pueden eliminar directamente a las plagas o cambiar las condiciones favorables del medio a condiciones adversas para el desarrollo de éstas.
C. **Tala de salvamento:** consiste en la eliminación total del arbolado en una o más áreas de la plantación con el fin de erradicar la plaga o enfermedad en un área determinada, éstas son denominados focos de infección debido a su condición. Los árboles derribados y el material secundario (ramas y ramillas) se deben de tratar en el sitio.
D. **Poda sanitaria:** es la remoción de una o más partes del árbol que han sido severamente afectadas por plagas o enfermedades. La remoción se efectúa por medio de podas.
E. **Raleo sanitario:** es el derribo de árboles aislados dentro de la plantación que están afectados severamente y cuya condición no puede revertirse.
F. **Control etológico:** consiste en aprovechar el comportamiento de la plaga ante ciertos estímulos, aprovechándolos para su control. Incluye el uso de feromonas sexuales, de agregación o antiagregación, atrayentes en trampas y cebos, repelentes e inhibidores de alimentación, entre otros.
G. **Control biológico:** es la regulación de la población de un organismo por medio de otro. Parte del principio de que en la naturaleza todo organismo tiene uno o más antagonistas que lo eliminan o compiten con él.

H. **Control químico:** plagas y enfermedades se controlan por medio de sustancias químicas o biológicas. Para la utilización de sustancias químicas en el control de plagas es importante:

- Seguir las normas de seguridad indicadas en la etiqueta para la aplicación, almacenamiento y eliminación de residuos.
- Usar los plaguicidas en forma sensata y racional.
- El uso excesivo y mal dirigido puede ocasionar resistencia en las plagas y mayor contaminación al medio ambiente.
- Utilizar los plaguicidas con oportunidad de aplicación, es decir, en el tiempo en que la plaga es más sensible y el producto trabaja con mayor eficacia.
- Utilizar productos selectivos.

4.9.3 Identificación de plagas

Los insectos que afectan principalmente a los árboles suelen clasificarse según la parte de la planta que afectan (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial [PAOT], 2000).

- **Descortezadores:** estos insectos se alimentan del cambium del árbol, el tejido a partir del cual crecen los árboles. En el proceso desprenden corteza lo que provoca desecación y la exposición a agentes patógenos
- **Defoliadores:** se trata de insectos que consumen o tiran el follaje, reduciendo la capacidad del árbol para fotosintetizar, ocasionando que pierda su vigor o incluso perezca si la infestación es severa.
- **Barrenadores:** estos organismos se alimentan de la madera, excavando galerías en el tronco. Dado que el leño es tejido muerto, los barrenadores no suelen causar mucho daño, excepto cuando ya han consumido mucha madera. Esto afecta la conducción de agua hacia las hojas, las cuales entonces se caen. También pueden debilitar el tronco y derribar al árbol. Sin embargo, la mayor amenaza de los barrenadores es que generalmente son portadores de organismos patógenos.
- **Carpófagos:** estos insectos se alimentan de los frutos, conos (piñas) y semillas. En estas condiciones el bosque es incapaz de regenerarse.
- **Cogolleros:** se alimentan de los brotes, impidiendo el crecimiento del árbol y provocando que crezca deforme. Estos árboles desfigurados carecen de valor comercial.
- **Muérdagos:** no sólo los insectos provocan daños. Sobre los árboles pueden desarrollarse plantas parásitas que les roban nutrientes y retrasan su crecimiento. Debido a que las especies más nocivas pertenecen a la familia del muérdago europeo, generalmente se les conoce con ese nombre.

En la siguiente Tabla se muestran las plagas que pueden acaecer a los sitios revegetados y algunos sistemas de control utilizados para combatir el daño causado, así como algunas de las especies más comunes que atacan a las plantaciones.

Tabla 41

Principales plagas en las plantaciones forestales y los sistemas de control.

Tipo de plaga	Principales especies	Identificación	Control	Descripción
Descortezadores	*Dendroctonus adjuntus, D. mexicanus, D. frontalis, D. aproximatus, D. ponderosae, D. brevicomis, D. parallelocolis y D. jeffreyi*	Presencia de grumos de resina en el fuste y/o ramas, los grumos de resina son suaves, tornándose duros y de coloración rojiza. Cambio de coloración del follaje de verde a rojizo, pasando de verde alimonado a amarillo. Presencia de galerías en la corteza interna.	Control mecánico Control químico	Derribo, troceo, descortezado y quema o enterrado o abandono de la corteza. Derribo y extracción inmediata o abandono. Extracción inmediata de los árboles afectados hacia aserraderos ubicados fuera del área forestal. Derribo, troceo y aplicación de plaguicidas. Extracción de los árboles afectados y aplicación de plaguicidas. Derribo, troceo, descortezado y aplicación de plaguicidas sobre la corteza. Descortezado de las trozas y ramas que presenten evidencias de daños. Uso de polietileno y pastillas fumigantes.
	Dendroctonus pseudotsugae.	En la superficie del fuste aparece un grumo de material rojizo formado por excremento, resina y partículas de floema, a veces difícil de distinguir. Cambio de coloración en el follaje de verde a rojizo. Presencia de galerías en la corteza interna.		
	Dendroctonus rhizophagus.	Presencia de grumos de resina en la base del tronco. Cambios de coloración del follaje de verde a rojizo. Presencia de galerías en espiral orientadas hacia arriba. Afecta arbolado pequeño hasta 10 cm de diámetro.		
	Dendroctonus valens.	Presencia de grumos de resina de gran tamaño, de hasta 5 cm de longitud, en la parte baja del fuste. Afecta árboles, sobre todo maduros.		

Tipo de plaga	Principales especies	Identificación	Control	Descripción
Descortezadores	*Ips mexicanus, I. bonanseai, I. pini, I. lecontei y I. caligraphus.*	En la superficie de la corteza de los árboles afectados aparecen montículos de aserrín. Presencia de galerías limpias en la corteza interna. El insecto ataca en las ramas y parte terminal del fuste. Cambio de coloración del follaje iniciando en la parte terminal.		
	Phloesinus sp.	Presencia de escurrimientos de resina en el fuste. Cambio de coloración en el follaje de verde a verde alimonado y rojizo. Presencia de galerías en la corteza interna.		
	Pseudohylesinus variegatus.	Cambio de coloración del follaje iniciando en la parte terminal. Presencia de galerías en la corteza interna.		
	Scolytus mundus, S. aztecus.	Presencia de galerías transversales al eje del árbol. Muerte descendente del arbolado infestado. Cambio de coloración del follaje iniciando en la parte terminal.		
	Pityophthorus spp.	Presencia de ramillas o puntas muertas, en algunas ocasiones provoca la muerte de arbolado joven. Cambio de coloración del follaje de la copa en forma parcial. Presencia de orificios en ramas y puntas. Galerías en forma de estrella.		

Tipo de plaga	Principales especies	Identificación	Control	Descripción
Descortezadores	*Géneros: Arceuthobium , Psittacanthus, Struthanthus, Phoradendrom, Cladocolea y Tillandsia.*	Las plantas parásitas son aquellas que poseen estructuras especializadas para obtener de sus hospederos el soporte y los nutrientes necesarios para su desarrollo. Así, provocan la reducción del crecimiento de sus hospederos y su debilitamiento. Pueden ocasionar infestaciones severas y hasta la muerte.		
Plantas parásitas	Ortópteros: grillos. Himenópteros: hormigas y avispas. Dípteros: moscas y mosquitos. Coleópteros: escarabajos. Lepidópteros: palomillas.	Visual, presencia de organismos.	Control mecánico o químico.	Dependiendo el grado de infección Poda de saneamiento (infección ligera). Programa de manejo (infección severa).:
Insectos defoliadores	Coleópteros: escarabajos. Lepidópteros: palomillas. Homópteros: pulgones.	Visual, presencia de organismos.	Control biológico: *Metarhizium anisopliae* (hongos entomopatogénicos).	Aplicación terrestre y aspersión en el área foliar. En aplicaciones aéreas, aspersión en la totalidad de la superficie afectada.
	Himenópteros: hormigas y avispas. Dípteros: moscas y mosquitos. Coleópteros: escarabajos Lepidópteros: palomillas.	Visual, presencia de organismos.	Control biológico: *Beauveria bassiana* (hongos entomopatogénicos).	Aplicación terrestre y aspersión en el área foliar. En aplicaciones aéreas, aspersión en la totalidad de la superficie afectada.

Tipo de plaga	Principales especies	Identificación	Control	Descripción
	Lepidópteros: palomillas.	Visual, presencia de organismos.	Control biológico: *Paecilomyces fumosoroseus* (Hongos entomopatogénicos).	Aplicación terrestre y aspersión en el área foliar. En aplicaciones aéreas, aspersión en la totalidad de la superficie afectada.
	Todos los insectos de cuerpo blando: pulgones, ácaros, chicharritas, mosquita blanca, trips.	Visual, presencia de organismos.	Control biológico: *Bacillus thuringiensis* (bacteria entomopatogénicos).	Aplicación terrestre y aspersión en el área foliar. En aplicaciones aéreas, aspersión en la totalidad de la superficie afectada.
	Especies que pupan en el suelo.	Visual, presencia de organismos.	Control químico: jabones agrícolas (sales potásicas de ácidos grasos).	Forma de preparación: 2 cc por litro de agua. Forma de aplicación: aspersión en el área foliar. En aplicaciones aéreas, aspersión en la totalidad de la superficie afectada.
	Insectos (diferentes especies que atacan los brotes de las ramas más tiernas).	Visual, presencia de organismos.	Control mecánico.	Recolección manual y destrucción para evitar eclosión en el siguiente ciclo.
Barrenador de brotes	Insectos (diferentes especies que atacan los brotes de las ramas más tiernas). Insectos (diferentes especies que atacan los tallos suculentos).	Visual, presencia de organismos Presencia del insecto por daños en la base del tallo, presencia de una gran cantidad de goma y resina en respuesta al ataque del insecto. Las galerías por larvas empiezan en el tallo hacia la parte superior de los mismos.	Selección del sitio y prácticas de cultivo.	La mejor manera de evitar los daños por los barrenadores de los brotes es seleccionar el sitio de la plantación en terrenos fértiles y bien drenados, mezclar especies para promover los enemigos naturales, control de malezas y programas de fertilización, todo esto con el fin de promover un rápido crecimiento del árbol hasta el umbral de altura que va de los 3.5 a los 7 metros.
			Control mecánico.	Poda de ramas.

Tipo de plaga	Principales especies	Identificación	Control	Descripción
Barrenador de brotes			Control biológico: *Beauveria bassiana* (hongos entomopatogénicos).	Aplicación terrestre y aspersión en el área foliar. En aplicaciones aéreas, aspersión en la totalidad de la superficie afectada.
			Control biológico: *Bacillus thuringiensis* (bacteria entomopatógena).	Aplicación terrestre y Aspersión en el área foliar. En aplicaciones aéreas, aspersión en la totalidad de la superficie afectada. Periodo de aplicación: cada 20 días en los meses que la plaga se presente con mayor intensidad.
			Control químico: insecticida sistémico carbofuran 5%.	Forma de preparación: granulado directo al suelo. Forma de aplicación: hacer una perforación de 10 cm de profundidad y aplicar 30 g del producto. Repetir esta acción cada 15 cm hasta completar la periferia del área de goteo.
			Control químico: Insecticida malathion 50%.	Dosis: 2 a 3 cc/ l de agua o 250 cc / 100 l de agua. Forma de aplicación: aspersión en el área foliar, ramas y brotes. Periodo de aplicación: aplicar cada 8 a 10 días aproximadamente, durante un periodo de 2 meses.
			Control químico: Insecticida dimetoato 4%.	Dosis: de 1 a 1.5 cc/ l de agua o 100 a 150 cc/ l de agua. Forma de aplicación: aspersión en el área foliar. Periodo de aplicación: aplicar cada 15 días, durante un periodo de 2.5 meses.
			Control químico: Insecticida carbaril 80%.	Dosis: de 2 a 3 g/l de agua o 200 a 400 g/100 l de agua. Forma de aplicación: aspersión en el área foliar. Periodo de aplicación: tratamiento 1 vez por mes.
			Control químico: Insecticida deltametrina 2.8%.	Dosis: de 3 a 5 cc/ l de agua. Forma de aplicación: aspersión en el área foliar. Periodo de aplicación: aplicar cada 10 a 12 días, durante un periodo.

Tipo de plaga	Principales especies	Identificación	Control	Descripción
Barrenador de tallos	Insectos (diferentes especies que atacan los tallos suculentos). Principalmente *Dendroctonus rhizophagus*.	Presencia del insecto por daños en la base del tallo, presencia de una gran cantidad de goma y resina en respuesta al ataque del insecto. Las galerías por larvas empiezan en el tallo hacia la parte superior de los mismos. Por lo general afecta al arbolado joven de entre 5-15 cm de diámetro y con alturas de 0.1 a 3 m. En arbolado recién atacado se observa solo la perforación en la base del fuste.	Control químico: encalado.	Aplicación de una lechada bordelesa en la base del tronco de los árboles. Dosis: 200 g de sulfato de cobre, 1 kg de cal, 4 l de agua, 5 mm de adherente, Parathión al 3%. Preparación: en una cubeta se disuelve la cal en 3 l de agua, en otra se disuelven los 200 g de sulfato de cobre en 1 l de agua. Posteriormente, se mezcla el sulfato en la cubeta que contiene la cal diluida, se agrega el adherente y el Parathión. Finalmente, se homogenizan todos los ingredientes. Aplicación: se aplica con brocha desde la base del tronco hasta la mitad de la altura libre del fuste. Periodo de aplicación: del mes de noviembre y dar mantenimiento hasta marzo o abril como medida de protección prolongada.
			Control mecánico.	Aplicar en dos etapas 1) Aplicar en el periodo en que las larvas se encuentran alimentándose en el tallo, se cortarán aquellos que presenten el primer síntoma de ataque desde su base para evitar que las larvas se desplacen a las raíces, se abandonan a la intemperie. Los insectos estarán expuestos al medio ambiente y las condiciones desfavorables le causarán la muerte. Sólo se cortarán árboles con diámetros menores a 5 cm, se evitará eliminar árboles de diámetros mayores que puedan resistir el ataque del insecto. 2) Se realiza cuando las larvas se encuentran en la raíz del árbol, se recomienda sacar los árboles con todo y raíz para exponer a los insectos al medio ambiente y provocar su muerte. Los árboles extraídos también pueden ser quemados para asegurarse que todos los insectos mueran. En esta etapa de control, los árboles afectados se detectarán fácilmente por presentar el follaje seco.

Tipo de plaga	Principales especies	Identificación	Control	Descripción
Plagas de raíz	*Dendroctonus rhizophagus* y *Phyllophaga sp*. (gallina ciega).	Por lo general afecta a arbolado joven entre 5-15 cm de diámetro y alturas de 0.1 a 3 m. En arbolado recién atacado se observa sólo la perforación en la base del fuste. Los daños más evidentes son el amarillamiento, reducción de crecimiento y muerte del árbol. Cuando se hacen más evidentes los daños es a finales del verano y principios del otoño.	Control biológico: con entomopatógenos *Metarhizium anisopliae*.	Forma de preparación del producto para aplicaciones terrestres para cubrir una hectárea: disolver 240 gramos de Metarhizium anisopliae en jabón agrícola (ácidos grasos no iónicos al 30%). Forma de aplicación: aspersión en la zona de goteo de los árboles. La aplicación se debe hacer junto al riego o antes de éste.

Fuente: CONAFOR, 2007.

4.10 Reposición de plantas muertas

Durante el mantenimiento de los diferentes polígonos de revegetación se debe revisar la incidencia de individuos muertos. Tan pronto se identifican, se contabilizan para la programación de la reposición, preferentemente en la época de lluvias. Si no se puede realizar esta acción, se debe facilitar el riego de asentamiento a todas las plantas de reposición.

El procedimiento es similar al de revegetación y consiste en apertura de cepas, aplicación de hidrogel, plantación y elaboración de cajete, así como el apisonamiento de la cepa elaborada (Kerkus, 2020).

Es importante mencionar que dentro de los alcances del mantenimiento se debe considerar la propagación de especies arbóreas en un vivero rústico que cumpla con una producción suficiente para abastecer al proyecto durante el tiempo establecido de reposición del arbolado. A continuación, se presenta un ejemplo de la reposición de arbolado muerto en sitios reforestados.

Figura 82
Ejemplo de reposición de arbolado en áreas destinadas a la compensación ambiental por obras de infraestructura de caminos y vías férreas.



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

Capítulo 5
Monitoreo de áreas revegetadas

Un componente fundamental en la evaluación del éxito de una revegetación es el monitoreo, que consiste en llevar a cabo un registro periódico de datos de sobrevivencia e indicadores de calidad de la salud de las plantas, durante un periodo recomendado de tres a cinco años, ya que una plantación se considera establecida cuando los individuos han sobrepasado la altura del matorral competidor o la altura máxima del alcance de los herbívoros presentes en el área (SEMARNAT, 2009).

El objetivo de la revegetación es establecer comunidades de plantas a lo largo del derecho de vía y otros sitios relacionados con la construcción o conservación de las carreteras. Por lo que es necesario supervisar regularmente el sitio del proyecto para evaluar los avances e intervenir si es necesario. El monitoreo tiene la finalidad de corregir, manejar y mantener.

El monitoreo retroalimenta el éxito o fracaso en un proyecto de revegetación. Esta información puede ser empleada para hacer modificaciones y mejorar proyectos de revegetación futuros. La información que se obtenga del monitoreo puede ayudar a determinar si las acciones correctivas (resiembra, reposición de plantas muertas) son apropiadas.

5.1 Plan de monitoreo

Para lograr el éxito de una revegetación es necesario establecer un Plan de monitoreo que incluya los siguientes pasos:

- Determinar qué aspectos del proyecto serán monitoreados.
- Desarrollar un Plan de monitoreo.
- Colectar datos de campo.
- Analizar los datos de campo.
- Aplicar medidas correctivas.

Desarrollar un Plan de monitoreo implica que se deben tener claros los objetivos del proyecto de revegetación para saber qué indicadores registrar. Un buen proyecto de monitoreo no se define por la cantidad de datos colectados, sino porque los datos colectados sean los adecuados y que respondan efectivamente al cumplimiento de los objetivos establecidos en el proyecto de revegetación.

No todos los proyectos de revegetación tendrán que ser monitoreados con la misma intensidad. En algunos proyectos bastará únicamente con una revisión de campo y fotografías, mientras que, en otras áreas dentro del proyecto, podrían implicar un monitoreo con un diseño estadístico. El primer año es recomendable realizar al menos un recorrido semestral, con registro de observaciones o evaluaciones cualitativas, posteriormente el monitoreo puede ser anual o más espaciado. Para los muestreos de suelo y vegetación es recomendable establecer sitios permanentes de muestreo que permitan ser continuamente monitoreados y analizar los cambios en las propiedades ambientales a lo largo del tiempo.

Es importante que una persona sea la responsable de las actividades de monitoreo. Esta persona será la encargada de desarrollar e implementar el plan de monitoreo, así como de realizar la colecta de datos, los análisis y el reporte final del monitoreo.

El primer año de monitoreo después de completar el proyecto de revegetación, se evalúa si algunas áreas debiesen ser resembradas o replantadas, y para determinar la eficacia del control de la erosión (geotextiles, acolchados). Especificar el mes o estación en la que el proyecto será monitoreado es importante. Si el objetivo del monitoreo es la identificación de las especies de plantas, el monitoreo debe llevarse a cabo en el momento fenológico adecuado que sería la época de floración. Si el objetivo es registrar la supervivencia o crecimiento, el momento apropiado para llevar a cabo el monitoreo es después del establecimiento de las plantas, generalmente 6 meses a un año después de la plantación. En climas con periodos prolongados de sequías, el monitoreo se verifica en otoño. El registro de la cobertura vegetal para el control de la erosión del suelo es realizado antes de los periodos intensos de lluvia (generalmente verano).

La unidad de muestreo es el área en la cual se empleará un procedimiento específico de monitoreo. Los proyectos de revegetación pueden ser monitoreados como una o varias unidades de muestreo. Una forma de determinar las locaciones de las unidades de muestreo es revisar el mapa con las unidades de revegetación. Si el proyecto es grande o complejo, algunas o todas las unidades de revegetación pueden ser tratadas como unidades de muestreo por separado. Tener en mente el propósito del monitoreo desde el principio, ayudará a determinar las áreas más importantes a monitorear.

5.2 Muetreo del suelo en sitios revegetados

Los cambios en la calidad del suelo pueden analizarse mediante muestreos realizados en los monitoreos. Esto se realiza a través de variables que sirvan para evaluar la condición del suelo (Arshad y Coen, 1992), dichas variables se conocen como indicadores, porque representan una condición y conllevan información acerca de los cambios y tendencias del suelo (Dumanski *et al.*, 1998). Los indicadores son instrumentos de análisis que permiten simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos. Los indicadores de la calidad del suelo pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas o procesos que ocurran en el suelo. Los indicadores que se empleen deben reflejar las principales restricciones del suelo en congruencia con la función o las funciones principales que se evalúen.

Los indicadores deberían permitir: a) analizar la situación actual e identificar los puntos críticos; b) analizar los posibles impactos antes de una intervención; c) monitorear el efecto que tiene la revegetación en la estabilidad y recuperación del suelo, y d) determinar la eficiencia de los procedimientos.

Para que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo sean consideradas indicadores, deben cubrir las siguientes condiciones: a) describir los procesos del ecosistema; b) reflejar los atributos de sostenibilidad que se quieran medir; c) ser sensibles a variaciones de clima y manejo; d) ser aplicables a condiciones de campo; e) ser reproducibles; f) ser fáciles de entender; g) ser sensibles a cambios en el suelo como resultado de las acciones de revegetación.

Las propiedades físicas, química y biológicas pueden ser usadas como indicadores para evaluar la calidad del suelo, ya que pueden variar de localidad a localidad, dependiendo del tipo y uso, función y factores de formación de éste (Arshad y Coen, 1992). La identificación efectiva de los indicadores apropiados para evaluar la calidad del suelo depende del objetivo. Ésta debe considerar los múltiples componentes de las funciones del suelo en particular el productivo y el ambiental. La identificación es compleja debido a la multiplicidad de factores químicos, físicos y biológicos que controlen los procesos biogeoquímicos y su variación en intensidad con respecto al tiempo y espacio (Doran *et al.*, 1996).

Las características físicas del suelo son una parte necesaria en la evaluación de la calidad de este recurso porque no se puede mejorar fácilmente. Las propiedades físicas que pueden ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo, son aquellas que reflejan la manera en la que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además estén relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros. La estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración profundidad del suelo superficial, capacidad de almacenamiento del agua y conductividad hidráulica saturada con las características físicas de suelo que se han propuesto como indicadores de su calidad. La caracterización y la evaluación edafoecológica que se hace para conocer las propiedades de un suelo se puede hacer con datos de campo como se indica en el manual elaborado por Siebe *et al.*, 2016. Sin embargo, muchas propiedades edáficas que se registran en campo tardan mucho tiempo en mejorar, por lo que si se desea registrar cambios a corto plazo es necesario analizar indicadores sensibles que generalmente tienen que ser analizados en laboratorio.

5.2.1 Indicadores del suelo

En la Tabla que se presenta a continuación, se describen algunos indicadores del suelo que se propone evaluar después de 5 años, o el tiempo que establezca la autoridad ambiental que condicione los proyectos, de que se establezca la plantación o siembra.

Tabla 42
Indicadores del suelo que se propone evaluar después de los 5 años.

Propiedades	Indicador	Relación con la condición y función del suelo	Valores o unidades
Físicas	**Profundidad del suelo**	Estima la productividad potencial y la erosión.	cm o m
	Color	Refleja el contenido de materia orgánica y los procesos de oxidación.	%
	Textura	Retención y transporte de agua y compuestos químicos; erosión del suelo.	% de arena, limo y arcilla; pérdida en el sitio o unidad de revegetación.
	Rocosidad	Transporte de agua.	% de volumen
	Estructura	Balance hídrico, aireación del suelo, potencial de rendimiento y erosionabilidad.	N/A
	Estabilidad de agregados	Movimiento y almacenamiento de agua en el suelo, la erosión, desarrollo radicular y actividad microbiana.	mm
	Capacidad de retención de agua	Relación con la retención de agua, transporte, y erosividad, humedad aprovechable, textura y materia orgánica.	% (L/m^2)
	Densidad aparente	Porcentaje de concentración de sustrato.	g/cm^3
	Penetración de raíces	Denota la posibilidad real que tienen las raíces para su desarrollo en el horizonte.	dm^2
	Porosidad	Capacidad para que las plantas tomen agua del suelo.	mm
	Compactación	Proceso mecánico que genera un aumento de la densidad por la reorganización de las partículas del suelo.	%

Propiedades	Indicador	Relación con la condición y función del suelo	Valores o unidades
Químicas	**Materia orgánica en el suelo**	Indica las condiciones físicas del suelo, aumenta la infiltración del agua, disminuye la erosión y aumenta el potencial productivo.	%
	Acidez y alcalinidad (pH)	Define la actividad química y biológica.	Comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana.
	Salinidad	Guarda relación con la asimilación de nutrientes por parte de las plantas y la actividad microbiana del suelo.	Ohm/cm
Biológicas	**C y N de la biomasa microbiana**	Potencial microbiano catalítico y depósito para el C y N, cambios tempranos de los efectos del manejo sobre la materia orgánica.	kg de N o C/ha con relación al C y N total o CO_2 producidos.
	Respiración, contenido de humedad y temperatura	Mide la actividad microbiana, estima la actividad de la biomasa.	kg de C/ha d relativo a la actividad de la biomasa microbiana, pérdida de C contra entrada al reservorio total de C.
	N potencialmente mineralizable	Productividad del suelo y suministro potencial de N.	kg de N/ha d relativo al contenido de C y N total.

Asimismo, en esta fase será importante analizar a detalle los siguientes aspectos del suelo.

A. Estabilidad de la estructura del suelo.

La estabilidad de los agregados es un indicador clave para evaluar la degradación física. La estructura del suelo depende parcialmente de la presencia de agregados estables compuestos de partículas primarias y agentes vinculantes orgánicos e inorgánicos. La estabilidad de los agregados se refiere a su habilidad para resistir el estrés ocasionado por procesos de expansión y contracción y la humidificación rápida ocasionada por la lluvia y en general para cada perturbación mecánica y fisicoquímica que causa la desintegración de los agregados. La estructura es una propiedad importante de los suelos que ejerce una influencia directa sobre los servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo, como dar soporte a las plantas, permitir la vida animal, el secuestro de carbono y garantizar la calidad del agua (Shirazi y Boersma, 1984).

La degradación del suelo usualmente aumenta el declive de la estructura. Sin embargo, se espera que la restauración mejore la estructura del suelo a lo largo del tiempo y se incremente la estabilidad de los agregados. Para un adecuado monitoreo este indicador debería evaluarse cada cinco años. Se recomienda realizar este análisis en laboratorio.

B. Capacidad de retención de agua.

Es una medida simple de la habilidad del suelo para proporcionar agua para el crecimiento de las plantas. Es una propiedad hidráulica del suelo, es la cantidad de agua que está disponible para las plantas y que es retenida por el suelo contra la gravedad. Es el agua retenida por el suelo entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. Puede ser estimada en campo empleando un equipo reflectómetro del dominio de tiempo o TDR por sus siglas en inglés (Time domain reflectometer) o se puede calcular en laboratorio con una olla de presión. La capacidad de retención de agua disponible depende de la textura y de la materia orgánica. La primera depende fuertemente del material parental y la materia orgánica se espera que mejore con la aplicación de enmiendas. Como otros indicadores físicos, se recomienda que esta variable se evalúe cada cinco años después de la restauración.

C. Erosión.

La erosión puede ser definida como la remoción acelerada de suelo superficial a través del agua, viento o labranza, deforestación, sobrepastoreo y construcción, estos factores erosivos son los más importantes en las zonas montañosas. La erosión del suelo es el conjunto de procesos mediante los cuales se produce la separación de los productos del intemperismo del sustrato original, esta separación va acompañada del transporte y deposición de materiales por acción del viento y/o del agua, por lo que repercute de forma negativa en el desarrollo natural del suelo y en su capacidad productiva.

La erosión del agua depende de varios factores, incluyendo la topografía, la cobertura de las plantas, el manejo de la tierra, la erosividad de la lluvia, y la erodavilidad del suelo. La erodavilidad del suelo es determinada por propiedades intrínsecas como la textura y el contenido de materia orgánica. La erosión puede ser estimada por medio de la ecuación de la pérdida de suelo que considera estos factores. Los diferentes términos de la ecuación se calculan o estiman para cada ladera empleando percepción remota y datos de campo.

Inmediatamente después de haber aplicado los tratamientos de restauración en los sitios, la erosión puede aumentar debido a la perturbación que se genera por los trabajos requeridos y por el pobre desarrollo de la cobertura vegetal protectora. Para evaluar correctamente los efectos de la restauración del suelo, la erosión debería registrarse previamente a la implementación, inmediatamente después y anualmente por los cinco años posteriores. Una nueva evaluación 10 años después de su implementación.

Este indicador se medirá en zonas que presenten suelos desprovistos de vegetación o que recién empiece su desarrollo, estas corresponden a zonas afectadas por la obra donde se llevará a cabo la construcción de las obras. Cabe mencionar que

las zonas que alcancen un desarrollo vegetal permanente generalmente alcanzan una tasa de erosión muy baja, que está dentro de los límites permisibles de pérdida de suelo.

El monitoreo de la erosión puede hacerse por medio de parcelas con clavos de erosión. Se puede implementar un diseño de análisis de varianza pareado con dos tratamientos en una unidad de revegetación, en uno se aplicará un tratamiento con vegetación y el otro carecerá por completo de vegetación (testigo), cada tratamiento constará de tres réplicas. Por ejemplo, si se necesita analizar la erosión que se presenta en los cortes después de ser revegetados, entonces deben buscarse tres cortes con condiciones ambientales similares (sobre todo la pendiente del talud) y en los que se haya aplicado la misma técnica de revegetación y que contengan áreas desprovistas de vegetación para establecer el tratamiento testigo. El material que se empleará son clavos de 30 cm de largo, pintados con el objetivo de marcar el nivel actual del suelo en cada tratamiento se colocan varios clavos, en función de la exactitud de la medición que se quiera lograr. Las dimensiones de la parcela pueden ser de 10 m de largo por 1.2 m de ancho. Los clavos se pueden disponer a una distancia de 30 cm a lo largo y a 40 cm a lo ancho de la parcela, de esta forma se alcanza un total de 140 clavos por parcela, como son dos tratamientos por unidad de revegetación, en cada unidad habrá 280 clavos y en total 840 clavos (por las tres repeticiones). Cada parcela será elegida de forma aleatoria en el lugar del ensayo. La medición de los clavos debe realizarse en la época de lluvias (julio a diciembre). En periodos de 15 a 20 días, obteniéndose dos registros por mes. La medición consiste en medir la cantidad de suelo erosionado o depositado a un costado del clavo. Cada clavo debe ser identificado a través de un sistema de coordenadas, lo que permitirá observar el comportamiento del suelo a través del tiempo.

Una vez obtenidos los datos, se pueden analizar por medio de análisis de varianza para determinar la existencia o no de diferencias significativas entre las medias de las parcelas de los dos tratamientos.

Para cuantificar el suelo erosionado o sedimentado en t/ha para el periodo de estudio, se multiplica el resultado de las medias expresadas en milímetros, por la densidad aparente del suelo Da (t/m^3) y por 10. La expresión matemática es la siguiente:

$$X(t/ha) = Y * Da * 10$$

Donde:

X = suelo erosionado (t/ha).

Y = altura media del suelo erosionado (mm).

Da = densidad aparente del suelo (t/m^3).

Los indicadores químicos propuestos afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la capacidad de retención de agua disponible y nutrimentos para las plantas y microorganismos.

D. Medición del espesor del horizonte orgánico.

El estado de conservación y desarrollo de los suelos se reconoce a través de capas aproximadamente paralelas a la superficie de diferentes características, estas capas se

llaman horizontes. La evaluación se hace colocando una cinta métrica de tal forma que el cero quede en el límite del horizonte orgánico superficial y se deja descender hasta alcanzar la profundidad total del perfil de suelo.

Cabe mencionar que, durante los primeros monitoreos, no se espera que se perciban horizontes orgánicos dentro de la zona donde se ha hecho la restauración, éstos se formarán con el tiempo y dependen principalmente del desarrollo y estabilidad de la vegetación. Esta variable puede medirse cinco años después de que se realice la restauración para percibir algún pequeño desarrollo en el horizonte orgánico.

E. Carbono orgánico del suelo.

El carbono orgánico es el principal componente (aproximadamente 58%) de la materia orgánica. La materia orgánica del suelo está hecha de sustancias de plantas y animales en varios estados de descomposición, así como células microbiales y productos, y es vital para el suministro de servicios ecosistémicos. En la escala local, la materia orgánica del suelo juega un rol crucial en la fertilidad del suelo, resistencia del suelo a la erosión y capacidad de retención de agua. A escala global, la dinámica de la materia orgánica es un factor relevante en el ciclo del C y N y en la resiliencia de los ecosistemas. Los almacenes globales de la materia orgánica se estiman en un promedio de 1500 PgC, en el primer metro del perfil de suelo, que es más que todo el carbono contenido en la atmósfera y la vegetación terrestre combinadas. Por estas razones, la materia y el carbono orgánicos son fundamentales para la evaluación de la calidad del suelo y son siempre incluidas en programas de monitoreo posrestauración.

Se espera que el carbono orgánico aumente en el tiempo. Como en un ecosistema natural, el carbono orgánico se recupera progresivamente en las zonas afectadas, se espera que se asemejen a aquellos niveles medidos en unidades conservadas cercanas. Para observar estos cambios la materia orgánica deberá ser medida cada cinco años y los análisis deben hacerse en laboratorio.

F. Fertilidad del suelo.

La disponibilidad de nutrimentos, la textura adecuada, la estructura física correcta y baja o nula salinidad, son condiciones requeridas para la fertilidad del suelo y mejorar el crecimiento de las plantas. En cualquier ambiente terrestre, la limitación nutrimental tiene la capacidad de transformar la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. La acidez del suelo es un factor relevante en determinar la disponibilidad de nutrimentos. El calcio, el potasio y el magnesio están disponibles en suelos neutros, mientras que el hierro, el manganeso, el cinc y el cobre están más disponibles en suelos ácidos, el fósforo está disponible en suelos ligeramente ácidos. Cada especie de planta requiere condiciones nutrimentales específicas por lo que es complejo establecer indicadores de fertilidad. Mantener el pH en valores entre 5.5 y 7.5 aseguraría la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes. El análisis debe realizarse cada cinco años y deben colectarse muestras de suelo para analizarse en laboratorio.

Los indicadores biológicos propuestos integran gran cantidad de factores que afectan la calidad del suelo como la abundancia y subproductos de micro y macroorganismos incluidos bacterias, hongos, nematodos, lombrices, anélidos y artrópodos. Incluyen funciones como la tasa de respiración, ergosterol y otros productos producidos por los hongos, tasas de descomposición de los residuos vegetales, N y C de la biomasa bac-

teriana. Como la biomasa microbiana es mucho más sensible al cambio del C total, se ha propuesto la relación C microbiano/C orgánico del suelo para detectar los cambios tempranos en la dinámica de la materia orgánica.

G. Materia orgánica y secuestro de carbono en el suelo.

La mineralización de la materia orgánica (descomposición) es la consecuencia de la nutrición microbial y metabolismo. Los microorganismos heterotrópicos explotan la materia orgánica del suelo como fuente de energía y como un producto de su respiración, la materia orgánica es liberada a la atmósfera como CO_2. Al mismo tiempo, otros nutrimentos retenidos en la materia orgánica quedan disponibles para las plantas.

La materia orgánica del suelo incluye una variedad de formas químicas con diferente descomposición. Se pueden distinguir tres fracciones de materia orgánica dependiendo de su susceptibilidad al ataque de microbiano. Una pequeña fracción lábil, muy activa utilizada por los microorganismos con una rotación cada dos o tres años. Una fracción lenta, con una rotación de 20 a 40 años, y una fracción larga, pasiva, muy recalcitrante y con una rotación de más de 2500 años. La fracción lábil es la responsable de los cambios en el clima, la composición y manipulación del suelo, y alerta de la degradación/rehabilitación del suelo más rápidamente que los indicadores físicos y químicos.

La materia orgánica recalcitrante del suelo depende de las propiedades químicas del material primario de las plantas, con estructuras poliaromáticas que son muy recalcitrantes, y carbohidratos, proteínas fosfolípidos entre los más lábiles. Al parecer la materia orgánica recalcitrante, también depende de su preservación física en el suelo. La materia orgánica del suelo puede permanecer almacenada por milenios en complejos organo-minerales (producidos entre la materia orgánica y arcillas minerales y coloides metálicos), los agregados pequeños del suelo también impiden relevantemente el ataque de los microorganismos.

Se propone el uso del porcentaje de carbono perteneciente a la fracción recalcitrante de la materia orgánica del suelo en relación con el carbono orgánico total, como un indicador del carbono orgánico del suelo químicamente recalcitrante. Después de las actividades de restauración, la vegetación progresa sobre el área restaurada con comunidades herbáceas y leñosas, esperando que se incremente la materia orgánica del suelo. También se propone el uso de la fracción lábil de carbono contenido en los micro agregados del suelo (0.53-2 µm de diámetro), como un indicador de la protección física que el suelo proporciona al carbono orgánico. Después de la restauración del suelo, se espera que se incremente la incorporación de carbono en microagregados del suelo. Se recomienda que la materia orgánica recalcitrante y la protección física del carbono del suelo sean medidas cada cinco años.

5.3 Indicadores de éxito de la revegetación

Considerando que el objetivo de la revegetación de áreas afectadas por la construcción de obras carreteras y vías férreas está centrado en la recuperación de las funciones ecológicas que se perdieron por las obras, se recomienda realizar monitoreos semestrales durante un periodo de por lo menos 5 años para evaluar la recuperación de la cobertura vegetal.

Es importante determinar el tipo de muestreo que se empleará, ya sean transectos o cuadrantes. En la sección de planeación existe un apartado en el que se recomienda el tamaño que deben tener los cuadrantes para muestrear la vegetación. En este caso se pretende que los cuadrantes o transectos se conviertan en sitios permanentes de monitoreo, para analizar los cambios en la vegetación a lo largo del tiempo. Los transectos son de forma alargada y estrecha, se pueden emplear para monitorear cortes de laderas, rellenos en laderas y caminos abandonados. Los cuadrantes se emplean en áreas de muestreo como patios de maniobra, bancos de tiro, o grandes áreas asociadas con la construcción de caminos.

Para logar lo anterior, se tomaron en consideración las variables que recomienda la Comisión Nacional Forestal para evaluar proyectos de revegetación, contemplando criterios como son la supervivencia, el estado sanitario y el vigor de las plantas. Además, para complementar los criterios antes mencionados, es importante evaluar el desarrollo de otras especies que se vayan estableciendo de manera natural.

5.3.1 Germinación de las semillas

El porcentaje de germinación de un área sembrada puede estimarse colocando pequeños cuadros de 50X50 cm o un poco más grandes. Se tiene que saber la cantidad de semillas sembradas por especie y por superficie (total de semillas). Cada 15 días (durante 5 meses) aproximadamente se registraría la cantidad de semillas germinadas y se puede registrar su altura con una cinta métrica. También se puede registrar la cantidad de hojas y/o estructuras reproductivas por individuo (etapa de crecimiento y reproducción). Es necesario tener al menos tres réplicas por cada unidad de revegetación.

% de germinación por especie=
(número de semillas germinadas *100 / número de semillas sembradas)

5.3.2 Estimación de la supervivencia

Esta tarea permite tener una estimación cuantitativa del éxito de la plantación bajo la influencia de los factores del sitio. El valor que se obtiene es la proporción de plantas que están vivas en relación con las plantas efectivamente plantadas. Para obtener la supervivencia de la plantación se extrapolan los datos de la superficie de muestreo a la totalidad de la plantación.

% Supervivencia en muestreo=
(número de individuos en muestreo *100) / número de individuos plantados

Para el caso de áreas pequeñas que permitan hacer un conteo directo de todos los ejemplares plantados la estimación del porcentaje de supervivencia se realizará multiplicando el número de individuos vivos registrados en el recorrido por 100 y posteriormente este resultado se dividirá entre el número de ejemplares plantados inicialmente. La supervivencia de las plantas puede registrase cada tres meses después de realizada la plantación.

5.3.3 Estimación del estado sanitario

Permite conocer la proporción de árboles sanos respecto a los árboles vivos en la plantación. Se considera que un individuo está sano cuando no presenta daños por plagas o síntomas de enfermedades en cualquiera de sus estructuras.

Las características visuales que presentan los individuos establecidos en una plantación permiten evaluar la calidad de desarrollo o salud de las plantas (González-Moreno, 2008).

Para evaluar la salud de los individuos se tendrán que considerar los siguientes elementos:

5.3.3.1 Abundancia del follaje

En la siguiente Figura se muestra la medición de abundancia de follaje.

Figura 83
Evaluación del follaje del ejemplar.



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

5.3.3.2 Color de las hojas

En la siguiente Figura se muestra la evaluación de la coloración de hojas de un ejemplar reforestado.

Figura 84
Evaluación de la coloración de hojas del ejemplar.



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

5.3.3.3 Color del tallo

En la siguiente Figura se muestra la evaluación de la coloración del tallo de un ejemplar reforestado.

Figura 85
Evaluación de la coloración del tallo del ejemplar.



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

5.3.3.4 Presencia de plagas o enfermedades

En la siguiente Figura se observa un ejemplo de la búsqueda de plagas o enfermedades en un ejemplar reforestado.

Figura 86
Evaluación para detectar la presencia de plagas o enfermedades en las hojas del ejemplar.



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

5.3.3.5 Vigor de la plantación

El vigor describe la proporción de órganos vigorosos del total de los árboles vivos, y se clasifica de la siguiente forma:

- **Bueno:** cuando la planta presenta un follaje denso, color verde intenso y tiene amplia cobertura de copa.

Figura 87
Ejemplo de planta con buena adaptación (vigorosa).



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

- **Regular:** cuando la planta muestra un follaje menos denso, color verde seco a amarillento y cobertura de copa media.

Figura 88
Ejemplo de planta medianamente adaptada (vigor medio).



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

- **Malo:** cuando el follaje es amarillento, ralo y de hojas débiles.

Figura 89
Ejemplo de planta no adaptada (vigor bajo).



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

5.3.4 Crecimiento

El crecimiento de los árboles y arbustos puede registrarse a través de la altura, el diámetro de las plantas a la base y la cobertura (registrada por medio de dos diámetros perpendiculares).

La altura puede medirse con una cinta métrica, midiendo desde la parte expuesta en la superficie del suelo, hasta la yema apical, descontando las ramas excepcionales o estructuras reproductivas.

El diámetro basal del tallo se puede medir con ayuda de un vernier la porción más cercana al suelo, por encima de ensanchamientos locales. Tratando de hacer la medición siempre en el mismo punto para no generar sesgo en las mediciones.

La cobertura tiene un crecimiento heterogéneo, por eso se registran dos mediciones del diámetro perpendicular y se utiliza la fórmula de una elipse para estimar la superficie de la cobertura.

$$Cobertura = ((D1 * D2) * \pi)/2$$

Donde:

D1 es el diámetro 1.

D2 es el diámetro 2.

El primer año el crecimiento de las plantas puede registrarse cada tres meses después de realizada la plantación, posteriormente se puede registrar cada 6 meses o un año.

5.3.5 Presencia de especies exóticas/invasivas

La proporción de especies exóticas invasivas puede ser considerada un indicador del grado de perturbación de un ecosistema. Una especie es considerada invasiva cuando rápidamente coloniza y ocupa un espacio por la alteración de su integridad ecológica y servicios ecosistémicos, impidiendo la regeneración, el establecimiento y el crecimiento de las especies nativas. Por otra parte, la presencia de especies nativas disrumpe la estructura fundamental y la función de los ecosistemas. Y consecuentemente reduce la biodiversidad nativa. Anualmente, el monitoreo de las áreas restauradas y alrededores es recomendado durante los primeros cinco años para prevenir el establecimiento de invasores potenciales.

5.4 Reporte del monitoreo y medidas correctivas

El propósito de redactar un reporte del monitoreo es documentar que tan exitosamente se ha implementado el proyecto de revegetación. Está escrito y sirve para hacer medidas correctivas y que la experiencia aprendida durante la implementación del proyecto de revegetación pueda ser aplicado a proyectos futuros. Muchos proyectos fallan en la realización del reporte del monitoreo por las siguientes razones:

- El Plan de monitoreo era muy complicado (se generaron muchos datos extraños).
- El monitoreo no fue diseñado de una manera estadística.
- Los objetivos del monitoreo no estaban bien determinados.
- Los datos recolectados fueron insuficientes para establecer una conclusión.
- Pérdida de datos.

Una razón de lo anterior es la cotidiana falta de tiempo o la distracción en otras actividades, por lo que no se terminan los reportes del monitoreo, ya que pareciera que no es una actividad relevante. El valor del reporte de monitoreo es que es un registro de las actividades realizadas en un proyecto de revegetación e indica qué tan bien éste fue ejecutado. Es un documento que se debe manejar como si los objetivos de la revegetación se hubieran cumplido. También es una guía para los especialistas en revegetación y diseñadores de caminos, para mejorar los métodos de revegetación y reducir los costos en proyectos futuros. Adicionalmente, los reportes de monitoreo pueden ser referenciados para evaluar la eficiencia de las especies mixtas y las técnicas de revegetación en respuesta al cambio climático.

Los reportes de monitoreo deberán contener la descripción de las actividades realizadas y la periodicidad, acompañados de los resultados obtenidos durante la evaluación y el reporte fotográfico que sustente el desarrollo de las actividades. Para la elaboración de los reportes de monitoreo el personal encargado deberá hacer las siguientes preguntas:

- ¿Quién hizo el monitoreo?
- ¿Cuándo se hizo el monitoreo?
- ¿Qué fue monitoreado?
- ¿Cómo se realizó el monitoreo?
- ¿Cómo fueron analizados los datos del monitoreo?
- El reporte de monitoreo debe responder estas preguntas:
- ¿Se cumplieron los objetivos de proyecto de revegetación?
- ¿Se necesitan acciones correctivas?
- ¿Qué lecciones fueron aprendidas?

Muchos reportes de monitoreo pueden contener los siguientes apéndices:

- Mapas.
- Análisis de datos.
- Fotos del monitoreo.
- Bitácoras del proyecto, conteniendo todas las actividades realizadas durante el proyecto.
- Un resumen de los tratamientos de revegetación o actividades realizadas durante el proyecto.

Las actividades de monitoreo tendrán que ser desarrolladas, considerando el criterio del técnico responsable de la ejecución, ya que en función de la superficie reforestada o revegetada se tendrá que decir si la evaluación se realiza por medio de un censo o por muestreo.

Para ambos casos se tendrá que considerar el conteo de ejemplares censados o presentes en la muestra, identificando la siguiente información:

- Polígono o zona de trabajo.
- Fecha de monitoreo o mantenimiento.

- Nombre científico.
- Presencia de plaga o enfermedad.
- Tratamiento que le aplica.

Una vez recabada la información en campo, se tendrá que proceder a su procesamiento en gabinete, esto con la finalidad de conocer el porcentaje de supervivencia e identificar los tratamientos que le apliquen como medida correctiva o tratamiento a plagas o enfermedades.

La revegetación de sitios altamente perturbados con plantas nativas es relativamente un nuevo campo de estudio. Cuando se diseña y ejecuta adecuadamente un proyecto de monitoreo, los resultados pueden proporcionar información útil para una amplia audiencia de practicantes, diseñadores, científicos y personal que trabaje en este campo. Las conferencias, publicaciones, revistas científicas, y otras publicaciones son espacios para compartir estos conocimientos. Los pequeños ensayos que se realizan durante la implementación del plan de revegetación (tasas de fertilización, semillas, hidrosiembra) son probablemente de gran interés para los diseñadores de caminos. La ciencia y práctica de revegetar sitios altamente perturbados puede ser una ventaja para que futuros proyectos de revegetación puedan ser mejorados.

Tabla 43

Ejemplo de bitácora de campo para el mantenimiento y monitoreo de la revegetación.

Logo empresa	BITÁCORA DE MANTENIMIENTO Y MONITOREO														Fecha: Revisión:
Nombre de la zona, parcela o polígiono	Ubicación		Fecha de mantenimiento y/o monitoreo	Monitoreo de iindividuos						Recursos utilizados (humanos y materiales)	Actividades de mantenimiento				Observaciones
	Coordenadas			Presencia de plaga o enfermedad		No. individuos	No. individuos monitoreados	No. especies con daño	Tipo de daño		Tipo de tratamiento				
	X	Y		Plaga	Enfermedad						Control de plaga	Fertilización	Limpieza de terreno	Retiro de especies muertas	

COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

Capítulo 6
Desarrollo de un proyecto ejecutivo de revegetación

En la actualidad, el desarrollo de un proyecto de revegetación concierne a diferentes disciplinas que se integran para cumplir de manera exitosa y eficiente los objetivos establecidos. La siguiente Tabla contiene los estudios y las mejores prácticas, que cada especialista dentro del ámbito de su competencia debe generar para llevar a cabo un proyecto de revegetación en proyectos de carreteras y vías férreas. Se puede observar que en cada una de las etapas de desarrollo del proyecto hay particularidades que conciernen a distintas disciplinas, y en cada una de ellas se indica la información que debe ser analizada para obtener los entregables requeridos.

Las diferentes fases que se describen están secuenciadas, de tal manera que una fase previa produce el insumo para la siguiente fase, y se indican las técnicas que deben utilizarse, así como las acciones recomendadas para lograr la implementación y restablecimiento de la vegetación en el derecho de vía y otras zonas afectadas por actividades propias de las carreteras y vías férreas. El proceso de revegetación no culmina con el establecimiento de la plantación, continúa con las fases de mantenimiento y monitoreo, que son cruciales para cumplir exitosamente con los objetivos inicialmente planteados.

Aunque la siguiente Tabla es un referente para el desarrollo de un proyecto de revegetación que incluye técnicas y procedimientos cuya eficiencia ha sido probada, es posible que bajo ciertas condiciones ambientales y propias de los proyectos otras técnicas y procedimientos puedan ser implementados exitosamente, con lo cual, el contenido descrito a continuación no es limitativo y no necesariamente sigue el orden presentado dentro de cada una de las fases.

Tabla 44
Desarrollo de un proyecto ejecutivo de revegetación.

Fase	Participación multidisciplinaria recomendada	Herramientas de análisis/ estudios	Acciones por ejecutar	Entregables
Planeación	• Ingeniero civil especialista en vías terrestres. • Ingeniero civil especialista en geotécnica. • Ingeniero civil especialista en hidráulica. • Ingenieros forestales. • Ingenieros en transportación. • Especialistas en SIG. • Arquitectos del paisaje. • Botánicos. • Genetistas. • Edafólogos. • Especialistas en restauración ecológica. • Abogados con experiencia en gestión de predios para reforestación. • Especialistas en protección ambiental.	• 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.	• 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. • Seleccionar las especies para la revegetación.	I. Identificación de los objetivos y las acciones a ejecutar (revegetación, reforestación, rehabilitación, recuperación o restauración). II. Línea de base de la vegetación. III. Identificación de corredores biológicos. IV. Listado de especies a utilizar. V. Determinar las actividades previas a la revegetación, (rescate y/o abastecimiento de plantas). VI. Mapa de revegetación con la descripción de las unidades. VII. Mapa con los sitios de referencia y de colecta de semillas. VIII. Cantidad de planta por rescatar, por comprar, total de plantas que se utilizarán en la revegetación. IX. Contratación o adquisición de predios para desarrollar actividades de revegetación.

Fase	Participación multidisciplinaria recomendada	Herramientas de análisis/ estudios	Acciones por ejecutar	Entregables
Ejecución	• Ingeniero civil especialista en vías terrestres. • Ingeniero civil especialista en geotécnica. • Ingeniero civil especialista en hidráulica. • Arquitectos del paisaje. • Botánicos. • Forestales. • Genetistas. • Edafólogos. • Especialistas en restauración ecológica.	• Implementación de técnicas de recuperación de suelos, p. ej. elaboración de Tecnosoles. • Técnicas de propagación de plantas por semilla o esquejes. • 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.	• Tratamientos en suelos de sitios previamente seleccionados. • Establecimiento o renta de un vivero, incluyendo insumos para su operación. • Obtención de los materiales para revegetar (p. ej. semillas o esquejes). • Compra o adquisición de planta para la revegetación. • Identificación de las zonas de siembra, limpieza de los terrenos. • Mejoramientos topográficos del suelo. • Implementación de técnicas de siembra: manual (al boleo, presionando contra el suelo), mecánica, hidrosiembra y banco de semillas. • Apertura de cepas, aplicación de enmiendas. • Implementación de la plantación: marco real, tres bolillo, plantación por cavidades o islas. • Transporte de plantas a zona de plantación. • Establecimiento de la plantación y riego de asentamiento. • Cercado de los predios, los materiales que se pueden emplear en la delimitación son postes y alambre de púas, rocas a manera de tecorrales, cercas vivas con esquejes. • Considerar en la rehabilitación de los caminos que se deberá evitar daños por uso de maquinaria en la vegetación existente. • Marcaje y georreferenciación. • Llenado de bitácora de plantación.	I. Especificación y desarrollo de las actividades de recuperación de suelos. II. Plantas rescatadas a lo largo del trazo. III. Compra de plantas. IV. Plantas nativas propagadas en vivero. V. Superficies en las que se aplicó la técnica de siembra. VI. Superficies en las que se aplicó la técnica de plantación. VII. Cantidad de plantas herbáceas, pastos, arbustos y árboles empleados en la revegetación. VIII. Bitácora de revegetación, reforestación o la actividad que haya sido elegida.

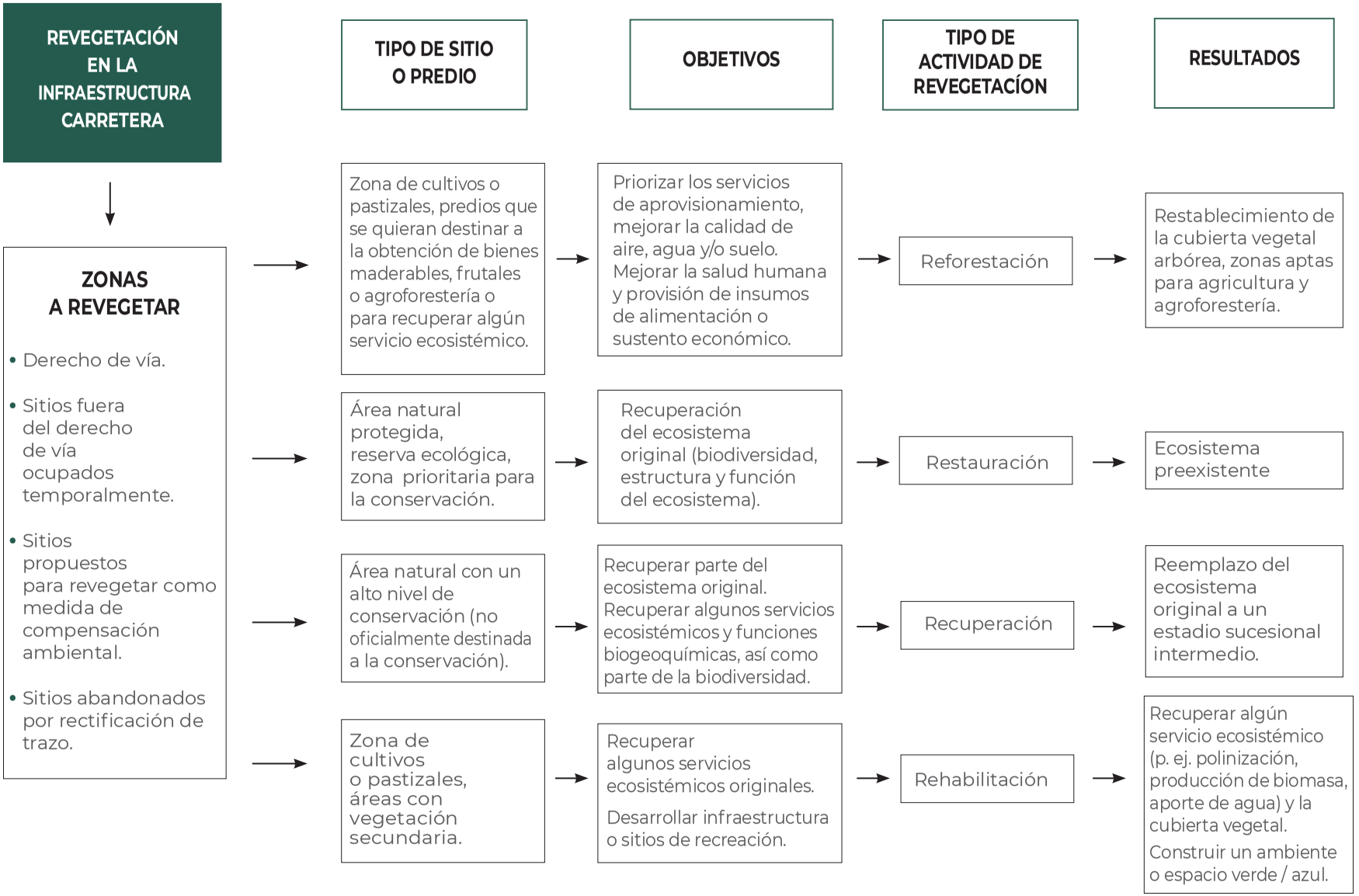
Fase	Participación multidisciplinaria recomendada	Herramientas de análisis/ estudios	Acciones por ejecutar	Entregables
Conservación	• Ingeniero civil especialista en vías terrestres. • Ingeniero civil especialista en geotécnica. • Ingeniero civil especialista en hidráulica. • Arquitectos del paisaje. • Botánicos. • Forestales. • Especialistas en restauración ecológica. • Personal de mantenimiento.	• Prácticas de conservación en los sitios revegetados.	• Capacitación al personal encargado del mantenimiento. • Tareas de mantenimiento como riego, deshierbe, podas, aclareos, fertilización, reconformación de cajetes, corrección de soportes o tutores en árboles, control de plagas y enfermedades, corrección de elementos de control de incendios, reposición de vegetación muerta.	I. Metros lineales empleados en la delimitación y especificación de los materiales y cantidades a utilizar. II. Metros lineales de caminos rehabilitados como accesos a predios. III. Superficies y cantidad de plantas a las que se les ha dado mantenimiento, especificando actividades realizadas. IV. Cantidad de reposición de plantas muertas. V. Bitácora de mantenimiento.
Monitoreo	• Arquitectos del paisaje. • Botánicos. • Forestales. • Especialistas en restauración ecológica.	• Estimaciones de la germinación de las semillas por especie. • Estimaciones de la supervivencia de plantas germinadas. • Estimaciones de supervivencia y crecimiento de hierbas, arbustos y árboles plantados. • Estimaciones de la cobertura vegetal. • Análisis de la calidad del suelo. • Detección de plagas y enfermedades.	Semestralmente se deberá realizar: • Evaluación de las técnicas de germinación y supervivencia de semillas en campo. • Evaluación de la supervivencia y crecimiento de plantas (incluyendo cobertura vegetal) revegetadas en campo. • Evaluación de indicadores de éxito diversos. • Reportes de monitoreo. Anualmente se pueden realizar: • Análisis químicos, físicos y biológicos del suelo.	I. Porcentaje de germinación y supervivencia de plantas provenientes de semilla. II. Porcentaje de supervivencia de arbustos y árboles plantados. III. Tasas de crecimiento de las diferentes especies. IV. Porcentajes de cobertura por unidad de vegetación. V. Análisis de la calidad del suelo a lo largo del tiempo. VI. Bitácora de monitoreo. VII. Reporte de monitoreo.

6.1 Diagrama de decisión para un proyecto de revegetación

El siguiente esquema muestra un ejemplo de árbol de decisiones basado en las condiciones de los sitios a revegetar, los objetivos y los resultados posteriores a los impactos relacionados con las obras de infraestructura carretera.

Figura 90

Diagrama de decisión para un proyecto de revegetación en la infraestructura carretera.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

Referencias bibliográficas

Adkis, J., y Miller, W., 2008. Storage organs, en: Beyl, A., y Trigano, N., (ed), Plant propagation concepts and laboratory exercises, CRC Press, EUA.

Comisión Nacional Forestal; 2010a. "Manual básico de prácticas de reforestación". Gerencia de Reforestación de la Coordinación General de Conservación y Restauración de la Comisión Nacional Forestal. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional Forestal; 2010b. "Modelo de recuperación forestal propuestos para la Región VIII, Lerma-Santiago-Pacífico". Gerencia de Reforestación de la Coordinación General de Conservación y Restauración de la Comisión Nacional Forestal. SEMARNAT. México.

Arriaga, V., Cervantes, V. y Vargas-Mena, A. (1994). *Manual de reforestación con especies nativas: colecta y preparación de semillas, propagación y manejo de plantas*. Instituto Nacional de Ecología.

Arshad, M.A. y Coen, G.M. 1992. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. American J. of Alternative Agriculture 7: 25-31.

Autoridad del Canal de Panamá [ACP]. (2006). *Manual de Reforestación. Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá. Volumen I*. División de Administración Ambiental. http://www.cich.org/publicaciones/03/manual-reforestacion-vol1.pdf

Brown R, Amacher M. 1999. Selecting plant species for ecological restoration: a perspective for land managers. In: Holzworth LK, Brown R, compilers. Revegetation with native species: Proceedings, 1997 Society for Ecological Restoration annual meeting; 1997 November 12-15; Ft Lauderdale, FL. Ogden (UT): USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Proceedings RMRS-P-8. p. 1-16.Cancino, J. (2012). *Dendrometría básica*. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento Manejo de Bosques y Medio Ambiente.

Cano-Gómez, C. A. (2016). *Pasos de fauna* [Tesina de grado de especialización, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://repositorio.unam.mx/contenidos/pasos-de-fauna-141703?c=%7B#

Cibrián, T. D.; T. Méndez M.; R. Campos B.; H.O. Yates III y J. Flores L. 1995. Insectos Forestales de México/Forest insects of México. (CONFAN/NAFC) Publicación No. 6. Primera Edición. Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco, Estado de México, p 266-363.

Clewell A, Rieger J, Munro J. 2005. Guidelines for developing and managing ecological restoration projects. 2nd ed. Tucson (AZ): Society for Ecological Restoration International.

Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2007). *Manual de Sanidad Forestal*. Gerencia de Reforestación de la Coordinación General de Conservación y Restauración de la Comisión Nacional Forestal. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/15/810Manual%20de%20sanidad%20forestal.pdf

Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2009). *Restauración de ecosistemas forestales. Guía básica para comunicadores*. SEMARNAT. http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/579Restauraci%C3%B3n%20de%20ecosistemas%20forestales.pdf

Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2010a). *Manual básico de prácticas de reforestación*. Gerencia de Reforestación de la Coordinación General de Conservación y Restauración de la Comisión Nacional Forestal. SEMARNAT.

Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2010b). *Modelo de recuperación forestal propuestos para la Región VIII, Lerma-Santiago-Pacífico*. Gerencia de Reforestación de la Coordinación General de Conservación y Restauración de la Comisión Nacional Forestal. SEMARNAT.

Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad [CONABIO]. (2021). *Pastizales*. Biodiversidad Mexicana. https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/pastizales

CONABIO. (2016). Estrategia Nacional sobre Biodiversidad de México y Plan de Acción 2016-2030. México, D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos [México], 5 de febrero 1917.

CRISARA. (4 de enero de 2017). *Protocolo para la correcta plantación de almendro a raíz desnuda*. https://crisara.com/protocolo-plantacion-almendros/

Curtis, J. T. y McIntosh, R. P. (1951). An Upland Forest Continuum in the Prairie-Forest Border Region of Wisconsin. *Ecology,* 32(3), 476–496. doi:10.2307/1931725

Darris DC, Williams D. 2001. Native shrubs as a supplement to the use of willows as live stakes and fascines in western Oregon and western Washington. In: Haase DL, Rose R, editors. Proceedings of the conference: native plant propagation and restoration strategies: 2001 Dec 12-13; Eugene, OR. Corvallis (OR): Oregon State University, Nursery Technology Cooperative. P.112-120.Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica [USDA]. (1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*. http://agroecologiar.com/wp-content/uploads/2019/08/Guia-eval-calidad-y-salud-del-suelo.pdf.

Dirección General de Servicios Técnicos [DGST]. (2014). *Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras en México 2014*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Guias/guia-carreteras.pdf

Dirección General de Servicios Técnicos [DGST]. (2020). *Manual de diseño de pasos para fauna silvestre en carreteras*. SCT.https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_de_Fauna/ManualPasosparaFauna.pdf

Doran, J.W., Sarrantonio, M. y Liebig, M.A. 1996. Soil Health and Sustainability. Advances in Agronomy Vol. 56. Academic Press, Inc. San Diego, California.

Dumanski, J., Gameda, S. y Pieri, C. 1998. Indicators of land quality and sustainable land management. The World Bank, Washington DC, USA.

Emanuelli, P., Duarte, E., Milla, F., Orellana, O. y López, S. (2017). *Propuesta Metodológica para la Validación de la Cobertura y Uso de la Tierra Mediante la Elaboración de un Inventario Multipropósito de Recursos Vegetacionales y Levantamiento de Puntos de Control Mediante Visitas en Terreno*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). doi:10.13140/RG.2.2.17795.09765

Faustino, J. y Jiménez, F. (2000). *Manejo de cuencas hidrográficas*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Área de Cuencas y Sistemas Agroforestales. http://www.sidalc.net/REPDOC/A5762E/A5762E.PDF

Fischer, J. y Lindenmayer, D. B. (2007). Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. *Global Ecology and Biogeography,* 16(3), 265–280. doi:10.1111/j.1466-8238.2007.00

Foro Mundial de Paisajes (2014). https://archive.globallandscapesforum.org/glf-2014/wp-content/uploads/sites/pdf/GLF2Peru-ConceptNote-flyer_sp_web.pdf

González-Moreno, B. E. (2008). *Evaluación de reforestación en el parque nacional Malinche, Tlaxcala, México* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://repositorio.unam.mx/contenidos/375558

Hartmann, H.T., Kester. D. E., & Davies, R.T. (1997). Plant propagation. Principles and practices. Englewood, Cliffs, New Jersey: Regent Prentice Hall.

Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, W.L. Nelson. 1999. Soil Fertility and Fertilizers, 6th Edition. Upper Saddle River, N.J: Prentice-Hall, Inc. 499 p.

Hoag JC. 2003. Willow clump plantings. Boise (ID): USDA Natural Resources Conservation Service. Plant Materials Technical Note No. 42. 8 p.

Hutto, R. L., Flesch, A. D. y Fylling, M. A. (2014). A bird's-eye view of forest restoration: Do changes reflect success? *Forest Ecology and Management,* 327, 1–9. doi:10.1016/j.foreco.2014.04.034

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2017). Conjunto de datos vectoriales de *uso de suelo y vegetación. Escala 1:250,000. Serie VI*. CONABIO.

Iuell, B., Bekker, H. G. J., Cuperus, R., Dufek, J., Fry, G., Hicks, C., Hlavác, V., Keller, V., B., Rosell, C., Sangwine, T., Tørsløv, N. y Wandall, B. (Eds.) (2005). *Fauna y tráfico: Manual Europeo para la identificación de conflictos y el diseño de soluciones*. Organismo Autónomo Parques Nacionales.

Jordan III, W. R., Gilpin, M. E. y Aber, J. D. (Eds.). (1987). *Restoration Ecology: A Synthetic Approach to Ecological Research*. Cambridge University Press.

Kerkus. (2013). *Manual de procedimiento Bancos Semilleros* [Trabajos de restauración ecológica en el tramo comprendido entre el km. 204+600 al 214+500, incluyendo calles laterales y piv´s ubicados en el km. 214+500 al 230+000, en la autopista Durango-Mazatlán, en el estado de Sinaloa].

Kerkus. (2019a). *Informe de cumplimiento. Preparación de los sitios de reforestación. Se consideran las visitas prospectivas a los sitios de reforestación, su delimitación, ubicación de los caminos de acceso, utilización de caminos, brechas y/o claros existentes para el tránsito de personal; la disminución de herbáceas que dificulten la transitabilidad, así como la descarga de planta procedente del vivero, elaboración del reporte y todo lo necesario para su correcta ejecución* [Ejecución de los programas ambientales del km 103+500 al km 120+000 del tramo carretero Guadalajara-Colima. Proyecto Ampliación de la Autopista Guadalajara-Colima 103+500 al 120+000].

Kerkus. (2019b). *Informe de cumplimiento. Reforestación fuera del derecho de vía, basado en el Sistema Ambiental Regional el cual permite hasta un radio máximo de 50 km a partir del vivero donde son mantenidos los individuos. Incluye el transporte, trazo, acarreo, apertura de cepas, plantación, aplicación de silos de agua, conformación de cajetes, tutoreo en caso de requerirse, elaboración de reporte y todo lo necesario para su correcta ejecución* [Ejecución de los programas ambientales del km 103+500 al km 120+000 del tramo carretero Guadalajara-Colima. Proyecto Ampliación de la Autopista Guadalajara-Colima 103+500 al 120+000].

Kerkus. (2020a). *Monitoreo de las obras de Reforestación.* Ejecución de los programas ambientales del km 103+500 al km 120+000 del tramo carretero Guadalajara-Colima. Proyecto Ampliación de la Autopista Guadalajara-Colima 103+500 al 120+000.

Kerkus. (2020b). *Trabajos de mantenimiento. Mantenimiento de la primera y segunda etapa de reforestación* [Ejecución de los programas ambientales del km 103+500 al km 120+000 del tramo carretero Guadalajara-Colima. Proyecto Ampliación de la Autopista Guadalajara-Colima 103+500 al 120+000].

Kerkus. (2020c). *Informe de cumplimiento. Siembra al voleo. Incluye mano de obra, asesoría técnica, herramientas, entrega de reporte y todo lo necesario para su correcta ejecución* [Ejecución de los programas ambientales del km 103+500 al km 120+000 del tramo carretero Guadalajara-Colima. Proyecto Ampliación de la Autopista Guadalajara-Colima 103+500 al 120+000].

Kerkus. (2020d). *Informe de cumplimiento. Rehabilitación de las obras existentes de afine de taludes a mano en márgenes de arroyos, laderas de cañadas o áreas aledañas a las obras de drenaje. Incluye personal técnico, mano de obra, equipo, herramienta, elaboración de reporte y todo lo necesario para su correcta ejecución* [Ejecución de los programas ambientales del km 103+500 al km 120+000 del tramo carretero Guadalajara-Colima. Proyecto Ampliación de la Autopista Guadalajara-Colima 103+500 al 120+000].

Kerkus. (2020e). *Informe de cumplimiento. Rehabilitación de las obras existentes de muros de piedra en márgenes de arroyos, laderas de cañadas o áreas aledañas a las obras de drenaje. Incluye personal técnico, mano de obra, equipo, herramienta, elaboración de reporte y todo lo necesario para su correcta ejecución* [Ejecución de los programas ambientales del km 103+500 al km 120+000 del tramo carretero Guadalajara-Colima. Proyecto Ampliación de la Autopista Guadalajara-Colima 103+500 al 120+000].

Kerkus. (2020f). *Informe de cumplimiento. Rehabilitación de las obras existentes de bio-rollos de polipropileno (30 cm de diámetro) en márgenes de arroyos, laderas de cañadas o áreas aledañas a las obras de drenaje. Incluye personal técnico, mano de obra, equipo, herramienta, elaboración de reporte y todo lo necesario para su correcta ejecución* [Ejecución de los programas ambientales del km 103+500 al km 120+000 del tramo carretero Guadalajara-Colima. Proyecto Ampliación de la Autopista Guadalajara-Colima 103+500 al 120+000].

Kerkus. (2020g). *Informe de cumplimiento. Rehabilitación de las obras existentes de empalizadas en márgenes de arroyos, laderas de cañadas o áreas aledañas a las obras de drenaje. Incluye personal técnico, mano de obra, equipo, herramienta, elaboración de reporte y todo lo necesario para su correcta ejecución* [Ejecución de los programas ambientales del km 103+500 al km 120+000 del tramo carretero Guadalajara-Colima. Proyecto Ampliación de la Autopista Guadalajara-Colima 103+500 al 120+000].

Kerkus. (2020h). *Informe de cumplimiento. Rehabilitación de las obras de presas de morillos en márgenes de arroyos, laderas de cañadas o en áreas aledañas a las obras de drenaje. Incluye: acarreo de material (troncos), excavación, acomodo de los troncos, elaboración de reporte y todo lo necesario para su correcta ejecución* [Ejecución de los programas ambientales del km 103+500 al km 120+000 del tramo carretero Guadalajara-Colima. Proyecto Ampliación de la Autopista Guadalajara-Colima 103+500 al 120+000].

Kerkus. (2021). *Monitoreo de las obras de Restauración* [Ejecución de los programas ambientales del km 103+500 al km 120+000 del tramo carretero Guadalajara-Colima. Proyecto Ampliación de la Autopista Guadalajara-Colima 103+500 al 120+000]

Lamprecht, H. (1990). *Silvicultura en los trópicos: los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas, posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido* (A. Carrillo, Trad.). Deutsche Geesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ).

Landis, T.D. 1993. Forest Nursery Notes. United States Department of Agriculture (USDA). Forest Service. State and private forestry. Portland, USDA 41 P.

Landis T, Tinus RW, McDonald SE, Barnett JP. 1994. Nursery planning, development, and management. The container tree nursery manual. Vol 1. Washington (DC): USDA Forest Service. Agricultural Handbook 674-188 p.

Leger, E.A. 2008. The adaptive value of remnant native plants in invaded communities: an example from the Great Basin. Ecological Applications 18: 1226-1235.

Ley Agraria. *Diario Oficial de la Federación*, 26 de febrero de 1992. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/13_250618.pdf.

Ley de Desarrollo Rural Sustentable. *Diario Oficial de la Federación*. 07 de diciembre de 2001. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/235_030621.pd.f

Ley General de Cambio Climático. *Diario Oficial de la Federación*. 06 de junio de 2012. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_061120.pdf.

Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. *Diario Oficial de la Federación*, 5 de junio de 2018. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGDFS_260421.pdf.

Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental. *Diario Oficial de la Federación*, 28 de enero de 1988. http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/148.pdf.

Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental [Reforma de la ley publicada en 1988]. *Diario Oficial de la Federación*, 9 de enero de 2015. https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/148.pdf.

The Potash & Phosphate Institute [PPI], Potash & Phosphate Institute of Canada [PPC] y Foundation for Agronomic Research [FAR]. (1988). Manual de fertilidad de los suelos. http://hdl.handle.net/11348/4910

Mackenzie, A., Ball, A. y Virdee, S. (1998). *Instant Notes in Ecology*. BIOS Scientific Publishers.

Maginnis, S & W Jackson. 2003. The role of planted forests in forest landscape restoration. In: The role of planted forests in sustainable forest management. UNFF Intersessional Meeting, Wellington, NZ, 25-27 March 2003.

Marschner, H. (2012) Nutrición mineral de plantas superiores de Marschner. Elsevier, Londres.

Martínez, E. (1996). La restauración ecológica. *Ciencias,* 43, 56-61.

MEA. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: Our human planet. Summary for Decision Makers. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press. Washington, D.C. 2005.

Mintegui-Aguirre, J. Á. y Robredo-Sánchez, J. C. (1994). Caracterización de las cuencas hidrográficas, objeto de restauración higrológico-forestal, mediante modelos hidrológicos. *Ingeniería Del Agua,* 1(2), 69-82. doi:10.4995/ia.1994.2637.

Mok, J-H. Landphair, H.C., and Naderi, J.R., Landscape Improvement Impacts on Roadside Safety in Texas, Landscape and Urban Planning, Vol. 78, 2006, pp. 263-274.

Monsen SB, Stevens R. 2004. Seedbed preparation and seeding practices. In: Monsen SB, Stevens R, Shaw NL, compilers. Restoring western ranges and wildlands. Fort Collins (CO): USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. General Technical Report RMRS-GTR-136- volume 1. P. 121-154.

Martella B, Truper E, Bellis L, Renison D, Giodano P, Bazzano G, Gleiser R. (2012). Manual de Ecología Poblaciones: Introducción a las técnicas para el estudio de las poblaciones silvestres. Reduca (Biología)., Serie Ecología 5, 17.

Munshower FF. 1994. Practical handbook of disturbed land revegetation. Boca Raton (FL): CRC Press. 265 p.

Musálem, M. A. y Fierros, A. M. (1996). *Apuntes del curso: Silvicultura de bosques naturales*. Universidad Autónoma de Chapingo. División de Ciencias Forestales, Departamento de Ecología y Silvicultura.

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.

NADF006-RNAT-2016. Norma ambiental para el distrito federal, que establece los requisitos, criterios, lineamientos y especificaciones técnicas que deben cumplir las autoridades, personas físicas o morales que realicen actividades de fomento, mejoramiento y mantenimiento de áreas verdes en la Ciudad De México. Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 1 de abril de 2016. http://legismex.mty.itesm.mx/estados/ley-df/DF-N-NADF-006-RNAT-2016.pdf

N. M. Haddad, L. A. Brudvig, J. Clobert, K. F. Davies, A. Gonzalez, R. D. Holt, T.E. Lovejoy, J. O. Sexton, M. P. Austin, C. D. Collins, W. M. Cook, E.I. Damschen, R. M. Ewers, B. L. Foster, C.N. Jenkins, A. J. King, W. F. Laurance, D. J. Levey, C. R. Margules, B. A. Melbourne, A. O. Nicholls, J. L. Orrock, D. X. Song, J. R. Townshend, Habitat fragmentation and its lasting impacto on Earth´s ecosystems. Sci. Adv. 1, e1500052 (2015).

NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis; a fin de que los interesados en un plazo de 60 días naturales presentaran sus comentarios al Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Conservación, Protección, Restauración y Aprovechamiento de los Recursos Forestales de Suelos y Costas. *Diario Oficial de la Federación*, 17 de octubre de 2000. http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf.

NOM-059-SEMARNAT-2010. Norma Oficial Mexicana de Protección Ambiental– Especies nativas de México de flora y fauna silvestres– Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio– Lista de especies en riesgo. *Diario Oficial de la Federación*, 30 diciembre, 2010.

Nurul-Nasyitah Shukor, Hazandy Abdul-Hamid, Arifin Abdu y Mohd-Kamil Ismail, 2015. Efectos de la compactación del suelo sobre el crecimiento y las características fisiológicas de las plántulas de Azadirachta. Revista estadounidense de fisiología vegetal, 10: 25-42.

Olinka. (2020a). Ficha técnica de Ácidos Fúlvicos como mejorador de suelos [Página de Facebook]. Facebook. https://www.facebook.com/olinka.agr.3

Olinka. (2020b). Ficha técnica de Ácidos Húmicos como mejorador de suelos [Página de Facebook]. Facebook. https://www.facebook.com/olinka.agr.3.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación [FAO]. (2000). *Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos*. Boletín de tierras y aguas de la FAO 8. Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA).

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación [FAO]. (2002). *Los fertilizantes y su uso* (4ª ed.). Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación [FAO]. (2009). Guía para la descripción de suelos (4ª Ed.). https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf.

Organización Internacional del Trabajo [OIT]. (2014). *Convenio Núm. 169 de la OIT sobre pueblos indígenas y tribales en países independientes. Declaración de las Naciones Unidas sobre los Derechos de los Pueblos Indígenas*. OIT. Oficina Regional para América Latina y el Caribe.

Piaggesi, A. (2004). *Los microelementos en la nutrición vegetal*. VALAGRO S.p.A.

Pieri, C. (1995). Long-term soil management experiments in semi-arid Francophone Africa. En R. Lal y B. A. Stewart (Eds.), *Soil Management: experimental basis for sustainability and environmental quality* (pp. 225-264). CRC Press.

Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial [PAOT]. (2000). *Principales plagas forestales*. https://paot.org.mx/centro/inesemarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/07_Aprovechamiento/7.1_Recursos/data_recursos/recuadro1.htm

PPD-PNUD/GEF Panamá. 2019. Manual de Reforestación en 7 pasos. República de Panamá. Protección de la Fauna Mexicana, A. C. [Profauna]. (s.f.). Manual de Reforestación 1: Dónde hacemos crecer los árboles. Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Coahuila. http://www.sema.gob.mx/descargas/manuales/ATT00004.pdf.

Robles Berlanga, Héctor, "Saldos de las reformas de 1992 al Artículo 27 constitucional", Estudios agrarios. Revista de la Procuraduría Agraria, México, núm. 38, mayo-agosto, 2008, p. 140.

Rodríguez L., R. 1990. Plagas forestales y su control en México. Colección Cuadernos Universitarios. Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco, Estado de México. Serie Agronomía. Núm. 17, 217 p.

Rossi P. 1999. Length of cuttings in establishment and production of short-rotation plantations of Salix aquatica. New Forest 18:161-177.

Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. Editorial Limusa.

Reglamento de la Ley General de Vida Silvestre de 2014. *Diario Oficial de la Federación*, 9 de mayo del 2014. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGVS.pdf.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (1984). *Normas de Servicios Técnicos. Proyecto Geométrico: CARRETERAS. http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Normas/AAA4.pdf.*

Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (2018). *Manual de proyecto geométrico de carreteras. https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/manual-pg/MPGC_2018_16_11_18.pdf*

Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (2020). *Programa sectorial de comunicaciones y transportes 2020-2024*. Gobierno Federal de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/565614/Programa_Sectorial_de_Comunicaciones_y_Transportes_2020-2024.pdf.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2009, Restauración de Ecosistemas Forestales. Guía básica para comunicadores. México. Pp. 12-14.

Seremi de Medio Ambiente del Biobío. (2020). *Manual de técnicas básicas de restauración de ecosistemas forestales a escala de paisaje*. Gobierno Regional del Biobío.

Siebe, C., Reinhold, J. y Stahr, K. (2016). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo*. Sociedad Mexicana de Ciencia del Suelo.

Shirazi, M.A., Boersma, L., 1984. A unifying quantitative analysis of Soil Sei. Soc. Am. J., 48, 142-147.

Soil Survey Manual. Handbook N°.18. USDA. 1993.

Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. (2004). *The SER International Primer on Ecological Restoration*. Society for Ecological Restoration International.

Soil Survey Manual. Handbook N°.18. USDA. 1993.

Stark, H., Nothdurft, A., Block, J. y Bauhus, J. (2015). Forest restoration with Betula ssp. and Populus ssp. nurse crops increases productivity and soil fertility. *Forest Ecology and Management,* 339, 57–70. doi:10.1016/j.foreco.2014.12.003.

Steed JE, De Wald LE. 2003. Transplanting sedges (Carex spp.) in southwestern riparian Meadows. Restoration Ecology 11 (2): 247-256.

Stevens R, Van Epps GA. 1984. Seeding Techniques to improve establishment of forage kocia (Kocia prostrate [L.] Schrad.) and fourwing saltbush (Atriplex canescens [Pursh.] Nutt.) In: Tiedemann AR, McArthur ED, Stutz HC, Stevens R, Johnson KL, compilers. Proceedings- symposium on the biology of Atriplex and related chenopods; 1983 May 2-6; Provo, UT. Ogden (UT): USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. General Technical Report INT-172. p. 269-272.

St. John L, Ogle DG, Scianna J, Winslow S, Holzworth LK. 2003. Plant materials collection guide. Boise (ID): USDA Natural Resources Conservation Service. Plant Materials Technical Note No 1 12 p.

Strauss, S. Y, J. A. Lau, & S.P. Carroll. 2006. Evolutionary responses of natives to introduced species: what do introductions tell us about natural communities? Ecology Letters 9: 357-374.Therrell L, Cole D, Claassen V, Ryan C, Davies MA. 2006. Wilderness and backcountry site restoration guide. Missoula (MT): USDA Forest Service, Missoula Technology and Development Center. Pub # 0623 2815. 394 p.

Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [UICN] y World Resources Institute [WRI]. (2014). Guía sobre la Metodología de evaluación de oportunidades de restauración (ROAM): Evaluación de las oportunidades de restauración del paisaje forestal a nivel nacional o subnacional. Documento de trabajo (edición de prueba). UICN.

Urna Bios. (20 de noviembre de 2019). Consejos sobre cómo regar un árbol. https://urnabios.com/es/consejos-sobre-como-regar-un-arbol/.

U.S. Department of Transportation. (2017). *Roadside Revegetation. An Integrated Approach to Establishing Native Plants and Pollinator Habitat*. Federal Highway Administration.

Walker, L. R. (2005) Margalef y la sucesión ecológica. *Ecosistemas*, 14(1), 66-78. http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=70.

Wood, E. M., Pidgeon, A. M., Radeloff, V. C. y Keuler, N. S. (2012). Image texture as a remotely sensed measure of vegetation structure. *Remote Sensing of Environment,* 121, 516–526. doi:10.1016/j.rse.2012.01.003.

Zehm, A., Nobis, M. y Schwabe, A. (2003). *Multiparameter analysis of vertical vegetation structure based on digital image processing.* Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 198(2), 142–160.* doi:10.1078/0367-2530-00086.

Glosario

El glosario fue elaborado a partir de los conceptos utilizados en el desarrollo del Manual y que reconocen las fuentes bibliográficas que estudian temas relacionados con el medio ambiente.

Aclareo. Es una técnica muy parecida al preaclareo, pero se realiza después y cuando los árboles son mayores, de mayor diámetro (de 10 a 50 cm). Sirve para continuar con la distribución y mejoramiento de la población de árboles, iniciadas con los preaclareos.

Acolchados. Es una técnica que consiste en recubrir el pie de la planta en el suelo de diferentes materiales como películas plásticas, plantas, césped cortado y/o restos orgánicos forestales. Es una técnica que ayuda a proteger el suelo en sistemas productivos o de manejo forestal.

Acotamiento. Faja contigua a la calzada, comprendida entre su orilla y la línea de hombros de la carretera o, en su caso, la guarnición de la banqueta o de la faja separadora.

Adaptabilidad. Cualidades de adaptable.

Adsorción. Fenómeno por el cual un sólido o un líquido atrae y retiene en su superficie gases, vapores, líquidos o cuerpos disueltos.

Agregado natural. Se entiende por agregados a la colección de partículas de diversos tamaños que se pueden encontrar en la naturaleza, ya sea en forma de finos, arenas y gravas. Cuando el agregado proviene de la desintegración de las rocas debido a la acción de diversos agentes naturales se le llama agregado natural.

ADP. Nucleótido constituido por adenina, ribosa y dos moléculas de ácido fosfórico, formado por la hidrólisis del fosfato gamma del adenosintrifosfato (ATP) con liberación de energía. Es un regulador de la actividad de numerosas enzimas implicadas en el metabolismo energético. Cuando se encuentra en una elevada concentración en la célula indica un agotamiento energético en la misma.

Agroforestería. Es el término general utilizado para los sistemas y las tecnologías de uso de la tierra en los que se combinan deliberadamente plantas leñosas perennes (como árboles, arbustos, palmas o bambús) con cultivos agrícolas o animales en la misma parcela de tierra con algún tipo de disposición espacial y cronológica. La agroforestería se puede definir también como un sistema de manejo dinámico y ecológico de los recursos naturales que, bien a través de la integración de los árboles en las fincas y en los paisajes agrícolas o bien a través de la producción de productos agrícolas en los bosques, diversifica y sustenta la producción con objeto de incrementar los beneficios económicos, sociales y ambientales de los usuarios.

ANP. Área Natural Protegida. Porciones del territorio nacional, terrestre o acuática, representativas de los diferentes ecosistemas en donde el ambiente original no ha sido modificado en su esencia con la actividad del hombre y que están sujetas a regímenes especiales de protección, conservación, restauración y desarrollo.

Antrópico. Producido o modificado por la actividad humana

Antropogénica. Perteneciente o relativo a lo que procede de los seres humanos que, en particular, tiene efectos sobre la naturaleza.

Aprovisionamiento. El aprovisionamiento se define como la operación logística que tiene como fin proveer de materias primas o mercancía en general a algún espacio. Se asocia a términos como suministro o provisión.

Arboles deciduos o caducifolios. Hace referencia a los árboles o arbustos que pierden su hoja durante una parte del año, la cual coincide en la mayoría de los casos con la llegada de una época desfavorable para la planta, en este caso puede ser la estación más fría (invierno) en los climas templados o la temporada de seca en los climas cálidos y áridos.

ATP. El trifosfato de adenosina es la principal fuente de energía de los seres vivos.

Biodiversidad. 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.

Brecha cortafuego. Consiste en abrir líneas o franjas de 2 a 3 m de ancho, dependiendo de las condiciones del terreno y el objetivo de la práctica. Con la apertura de las brechas se busca eliminar todo el material combustible que se encuentre en las zonas críticas de la plantación para evitar que pueda provocar un incendio. Con este trabajo se logra aislar y proteger las áreas reforestadas.

Bosque. Ecosistema forestal principalmente ubicado en zonas de clima templado en el que predominan especies leñosas perennes que se desarrollan de forma espontánea y que cuentan con las características para ser considerados terrenos forestales arbolados.

Cajete. Es una obra mecánica que consiste en remover el suelo en torno a una planta establecida con anterioridad, se forma haciendo un bordo perimetral que tenga por radio el límite de las esquinas de la cepa.

Calzada. Parte de la corona destinada al tránsito de vehículos.

Cambio de uso de suelo en terrenos forestales. La remoción total o parcial de la vegetación forestal de los terrenos forestales arbolados o de otros terrenos forestales para destinarlos o inducirlos a actividades no forestales.

Camedoras. Género de palmas que se distribuyen solo en el continente americano, se distribuyen en selvas altas y medianas, perennifolias, y en bosque mesófilo entre los 0 y los 2,000 msnm, requieren de sombra para prosperar.

Capacidad de campo. Es el contenido de agua que tiene un suelo después que se saturó y drenó libremente por espacia de 24 a 72 horas (cuanto más pesado el suelo, más demora en llegar a la capacidad de campo.

Capilaridad. Propiedad de los fluidos que depende de su tensión superficial, la cual, a su vez, depende de la cohesión del fluido, y que le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar.

Captura de carbono. Las plantas son organismos que producen su propio alimento mediante la fotosíntesis. Durante dicho proceso, absorben el dióxido de carbono presente en la atmósfera y liberan oxígeno, por lo que son los organismos encargados de realizar la captura de carbono en un ecosistema. Este carbono queda almacenado como biomasa en los árboles, el suelo, la hojarasca y la madera muerta.

Catión. Ion con carga positiva.

Compensación ambiental por cambio de uso de suelo en terrenos forestales. Las obras y actividades de restauración de suelos, reforestación, protección y mantenimiento, que se realiza con el fin de rehabilitar ecosistemas forestales deteriorados, de controlar o evitar procesos de degradación de estos y recuperar parcial o totalmente las condiciones que propicien su persistencia y evolución.

Conectividad ecológica. La conectividad generalizada en ecología se define como procesos físicos, químicos y biológicos y sus interacciones entre ecosistemas en varias capas de la tierra. Este concepto también incluye el flujo de energía y la migración biológica causada por cambios en el entorno externo. También describe el grado objetivo de interrelación entre las diferentes unidades del paisaje. Se relaciona con la forma en que se construye un corredor y como este satisface las necesidades de permeabilidad de las especies de manera física, química o bilógica. Se considera que un corredor o camino conectado tiene una alta conectividad funcional si permite una gran cantidad de dispersión y movimiento individual y es compatible con los procesos ecológicos

Corona. Superficie terminada de una carretera, comprendida entre sus hombros.

Cuenca hidrográfica. Superficie geográfica delimitada por la parte más alta de las montañas a partir de la cual fluyen las corrientes de agua, las cuales se unen y desembocan a una presa, lago o al mar.

Cuneta. Canal que se ubica 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.

Deforestación. Es la acción de eliminar el bosque de forma permanente para darle al terreno un uso no forestal, con reducción de cobertura de copas de árboles a menos del 10% / Refiere a la conversión de los bosques a otro tipo de uso de la tierra independientemente si es inducido por humanos o no.

Dendrometría. Es la medición, cálculo y/o estimación de las dimensiones de los árboles y bosques; analiza las dimensiones de árboles y bosques desde un punto de vista estático. Las variables dendrométricas que se consideran para el análisis pueden ser diámetro normal, altura de árbol y cobertura de copa, dependiendo de los objetivos del análisis.

Densidad. Es la relación que existe entre el número de plantas de una especie o una forma de crecimiento, y la superficie de un lugar.

Derecho de vía. Superficie de terreno cuyas dimensiones fija la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, requerido para la construcción, conservación, modernización y, en general, para el uso adecuado de una carretera y de sus servicios auxiliares.

Desarrollo sustentable. Es el desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

Dinámica trófica o red trófica. Describe quién se come a quién en el medio silvestre e implica el trayecto de energía y nutrientes en un ecosistema. El proceso de transferencia de energía y nutrientes se relaciona con las redes de alimentación (redes tróficas).

Dosel. Es la capa de ramas y hojas formada por las copas de árboles vecinos, los cuales típicamente se encuentran cubriendo grandes áreas.

Endémica. Son aquellas que sólo habitan en un lugar determinado. Sin embargo, el término es relativo porque una especie puede ser endémica de un continente, un país, una región o un bioma.

Endemismo. Es un término utilizado en biología para indicar que la distribución de un taxón está limitada a un ámbito geográfico menor que un continente y que no se encuentra de forma natural en ninguna otra parte del mundo. Por ello, cuando se indica que una especie es endémica de cierta región, significa que sólo es posible hallarla de forma natural en ese lugar

Erodabilidad. Se refiere a la susceptibilidad del suelo a la erosión por el agua o el viento, y éste se identifica como un controlador secundario en la intensidad de los factores ambientales.

Erosión. El desgaste que se produce en la superficie del suelo por la acción de agentes externos como el viento y el agua y que son acelerados por la acción del hombre.

Erosividad. Capacidad potencial de agentes como el agua, el viento, la gravedad, o el hombre de producir erosión.

Especies de batalla. Son especies nativas que están localmente adaptadas y que cumplen con las siguientes características: tienen una alta amplitud ecológica, alta abundancia y son relativamente fáciles de propagar.

Especie nativa. Especie que se encuentra dentro de su área de distribución natural u original (histórica o actual) de acuerdo con su potencial de dispersión natural. La especie forma parte de las comunidades bióticas naturales del área.

Especie exótica. Especie introducida fuera de su área de distribución original. Muchas de las especies de plantas ornamentales y de animales domésticos son especies exóticas provenientes de otros continentes. Las especies exóticas no tienen relaciones evolutivas con las especies con las que se encuentran en su nuevo territorio.

Especies especialistas. Son especies que pueden ser propagadas, sin embargo, debido a falta de información de cómo propagar sus semillas, se lleva más tiempo y los costos son mayores. Los proyectos que contengan microclimas o suelos especiales pueden requerir una única mezcla de especies especialistas (p. ej. grupo de trabajo de humedales). Si únicamente una pequeña cantidad de especies especialistas es necesaria, entonces deberían considerarse otros métodos de propagación. Éstos incluyen la colecta de materiales vegetales en el campo o crecer plántulas en un vivero.

Especie invasora. Especie que por nuevas condiciones creadas en su ambiente aumenta su población y distribución geográfica. Son especies con gran capacidad de dispersión y colonización. Pueden ser especies nativas o exóticas. En general, causan daños al ambiente, a la economía y a la salud humana.

Estrato. La estructura vertical de la vegetación se observa a través de la estratificación de la vegetación. Los estratos son cada porción de masa vegetal de una comunidad contenida dentro de un límite de altura determinado". La estructura vertical se puede determinar pues en función de la altura, aunque es recomendable diferenciar los estratos teniendo en cuenta también los tipos biológicos o las formaciones.

Estudio Técnico Justificativo. Es un documento que el interesado debe presentar junto con la solicitud de autorización de cambio de uso de suelo en terrenos forestales. Dicho estudio se ciñe a la presentación de información técnica de campo, así como de gabinete obtenida a través de consultas en fuentes académicas y de investigación debidamente reconocidas.

Evaluación edafológica. Es un sistema de clasificación aplicado que evalúa la capacidad del suelo para su utilización óptima, es decir, obtener máximos beneficios con mínima degradación.

Fosforilación. Proceso mediante el cual se agrega un grupo de fosfato a una molécula, como un azúcar o una proteína.

Fuste. Tronco de un árbol.

Germoplasma forestal. Es el elemento de los recursos genéticos que maneja la variabilidad genética, entre ellos el polen, semillas y partes vegetativas.

Gestión Ambiental. La gestión ambiental es definida como un proceso permanente y continuo, orientado a administrar los intereses y recursos relacionados con los objetivos de la Política Nacional Ambiental a fin de alcanzar, así una mejor calidad de vida para la población, el desarrollo de las actividades económicas, el mejoramiento del ambiente urbano y rural, así como la conservación del patrimonio natural del país.

Horizontes del suelo. Se llaman horizontes del suelo a una serie de niveles horizontales que se desarrollan en el interior del mismo y que presentan diferentes caracteres de composición, textura, adherencia, etcétera.

Humus. Materia orgánica descompuesta acumulada en el suelo.

Incendio forestal. Combustión de la vegetación forestal sin control.

Infraestructura carretera. Es el conjunto de caminos públicos y privados, pavimentados, utilizado para la comunicación terrestre; el tránsito de vehículos; el trasporte de carga, personas y mercancías. En algunos casos está compuesta por estructuras como puentes, túneles y plazas de cobro.

Intemperismo. Es el proceso que provoca una modificación del estado o la composición natural de una roca a partir de una acción química, física o biológica. Las condiciones climáticas, el agua y el aire pueden provocar estas alteraciones.

Intercambio catiónico. Es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (arcillo, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden tener.

Ion. Átomo o agrupación de átomos que por pérdida o ganancia de uno o más electrones adquiere carga eléctrica.

Línea de base. Documento que proporciona una base de información contra la cual monitorear y evaluar el progreso y eficacia de una actividad durante la implementación de la misma y después de que se haya completado.

Macroelementos. Son aquellos elementos nutritivos absorbidos por la planta en mayores cantidades. En este grupo se incluye el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca) y magnesio (Mg). A su vez estos se dividen en macroelementos primarios (nitrógeno, fósforo y potasio) y secundarios (azufre, calcio y magnesio).

Manifestación de Impacto Ambiental (MIA). Es un instrumento de política ambiental que tiene el objetivo de prevenir, mitigar y restaurar los daños al ambiente, así como la regulación de obras o actividades para evitar o reducir sus efectos negativos en el ambiente y en la salud humana. Consiste en un estudio técnico-científico que indica los efectos negativos producidos por la ejecución de las obras o actividades.

Mantenimiento. Labores culturales que contribuyen a un mejor desarrollo de los individuos que constituyen la plantación, haciéndolos más productivos.

Mesoporos. Se consideran a los poros que retienen el agua disponible para las plantas.

Microelementos. Son aquellos elementos nutritivos absorbidos por la planta en cantidades menores, incluyéndose en este grupo el hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y boro (B).

Microporos. Son los poros que tienen la capacidad de retener agua que no se encuentra disponible para los cultivos.

Microorganismos edáficos. Es el conjunto de bacterias y hongos que se encargan de descomponer la materia orgánica vegetal de los suelos, es decir, la celulosa presente, que es rica en carbono. Por lo tanto, estos desempeñan un papel importante en el ciclo biogeoquímico del carbono en el suelo.

Monitoreo. Llevar a cabo un registro periódico de datos de sobrevivencia e indicadores de la calidad de salud de las plantas, durante mínimo uno y hasta tres años, ya que una plantación se considera establecida cuando ha pasado la altura del matorral competidor o la altura máxima del alcance de los herbívoros presentes en el área.

Morfogénesis. La morfogénesis es el estudio de las formas del paisaje, ligado con los procesos que le dieron origen.

Natividad. Si los objetivos de la revegetación son la restauración o reclamación, entonces se deberán excluir todas las especies exóticas.

Paleta vegetal. Es una colección de especies en un catálogo con descripciones, características y fotografías.

Pasivo ambiental. Se considera pasivo ambiental a aquellos sitios contaminados por la liberación de materiales o residuos peligrosos, que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de contaminantes, pero que implican una obligación de remediación. En esta definición se incluye la contaminación generada por una emergencia que tenga efectos a largo plazo sobre el medio ambiente (RLGPGIR, Art. 132) / Impacto ambiental negativo que se encuentra ubicado y delimitado geográficamente y que persiste después de finalizado el proyecto o las actividades antrópicas que lo ocasionaron, generando riesgos para la salud humana, la vida o el ambiente.

Pecoreo. Conducta de las abejas obreras que recolectan polen y néctar de la flora apícola de un determinado lugar geográfico.

Pecuarias. Actividad relacionada con la producción de ganado, forma un sector esencial dentro de las actividades agropecuarias, que a su vez se constituyen como actividades primarias dentro de la economía.

Pedogénesis. La pedogénesis es el estudio de la génesis u origen de un suelo, al igual que en la morfogénesis es el medio el que imprime su sello. La relación entre la morfogénesis y la pedogénesis es directa ya que existe una correspondencia entre la génesis de los suelos con el medio, específicamente con las formas del paisaje.

Pedregosidad. Porción relativa de piedras (y, en general, de fragmentos de roca) que se hallan en la superficie de un suelo/ Se define pedregosidad como las piedras de más de 25 cm que se encuentran dentro o sobre el suelo.

Pendiente. Relación entre el desnivel y la distancia horizontal que hay entre dos puntos.

Perfil del suelo. es la organización vertical de todos los horizontes del suelo.

Plaga forestal. Forma de vida vegetal o animal o agentes patógenos, dañino o potencialmente dañino para los recursos forestales.

Plantación. Acción y efecto de plantar (meter una planta, un esqueje, un tubérculo o un bulbo en tierra con el objetivo de que arraigue y crezca) / se refiere a la actividad del establecimiento de plantas, esquejes, hijuelos y cualquier parte asexual de una planta.

Procesos pedogéneticos. Son procesos bioquímicos con formación de complejos órgano minerales, es decir los componentes húmicos se asocian fuertemente con los minerales del suelo, lo que influye en los movimientos de transferencia o remociones que ocurren en el perfil del mismos. Estos procesos se dividen en generales (adición, pérdida, translocación y transformación) y específicos (podsolización, laterización, salinización, gelificación y calcificación).

Plántula. Se refiere a individuos jóvenes de árboles usados para establecer plantaciones, producidas en viveros o cosechados en el bosque natural.

Propagación. Es la producción de una planta a partir de una célula, un tejido, un órgano o parte de una planta madre.

Polinizador. Son animales que se alimentan del néctar de las flores y durante sus visitas transportan accidentalmente polen de una flora a otra, permitiendo que las plantas produzcan frutos.

Preaclareo. Es una técnica que sirve para distribuir correctamente la población de árboles en los terrenos. Se realiza cuando hay árboles que crecen al mismo tiempo y su diámetro es menor a 10 cm, pero que se encuentran muy juntos; uno de ellos, o varios, pueden haber crecido mal, chuecos o con mal desarrollo, por lo que son seleccionados para cortarse y dejar que los árboles más sanos o con mejor desarrollo se logren y se extraiga la mejor madera.

Punto de marchitez permanente. Es el contenido de agua de un suelo al cual la planta se marchita y ya no recobra su turgencia al colocarla en una atmósfera saturada durante 12 horas.

Recuperación vegetal. Es la recreación de un sitio que ha sido diseñado para ser habitado por las mismas especies o similares a las que existían antes de la perturbación. Difiere de la restauración en que la diversidad de especies es menor y los proyectos no recrean idénticamente la estructura, ni el funcionamiento que había antes de la perturbación. Sin embargo, el objetivo a largo plazo es la estabilización con un aporte mínimo (Jordan III *et al*., 1987).

Reforestación. Actividades de plantación o siembra de árboles en terrenos forestales (Comisión Nacional Forestal /Establecimiento de especies forestales en terrenos / Es la acción de poblar o repoblar con especies arbóreas o arbustivas, mediante plantación, regeneración manejada o siembra, cualquier tipo de terreno.

Rehabilitación vegetal. Este proceso crea un ecosistema alternativo que tiene una estructura y función diferente a la comunidad que había antes de la perturbación, puede ser un parque, un pastizal, o una plantación silvícola.

Restauración vegetal. Es la recreación de la estructura y la función de la comunidad de plantas, idéntica a la que existía antes de la perturbación. Su objetivo es la conservación, con la intención de maximizar la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas / Conjunto de actividades tendientes a la rehabilitación de un ecosistema forestal para recuperar parcial o totalmente sus funciones originales / Conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.

Revegetación. Consiste en cubrir con plantas (preferentemente nativas) los espacios que fueron perturbados. Es un término general que puede referirse a la reforestación, restauración, reclamación y rehabilitación.

Rocosidad. Se refiere tanto a los afloramientos como a las rocas expuestas en el suelo.

Secuestro de carbono. Proceso o actividad que implica la remoción de gases de invernadero de la atmósfera.

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.

Siembra. Es el acto de colocar semillas en la tierra para que germinen y desarrollen plantas nuevas.

Sotobosque. La vegetación que se desarrolla debajo del dosel arbóreo, comúnmente llamada sotobosque, tiene entre sus principales elementos estructurales a las briofitas, los líquenes, los helechos, las plántulas arbóreas, las herbáceas y los arbusto. Se le considera sotobosque a toda la vegetación de un bosque que crece más cerca del suelo.

Talud. Inclinación de la superficie de los cortes o de los terraplenes.

Tecnosol. Suelos creados por el hombre, se caracterizan porque tienen más del 20% de artefactos en los primeros 100 cm desde la superficie.

Terrón. Agregado artificial del suelo (se hace con la labranza).

Tutor. Es un palo u otro objeto que se utiliza para formar la estructura de una planta.

Umbrófila. especie de planta tolerante a la sombra y generalmente reproduciéndose y/o viviendo bajo sombra.

Unidades de revegetación. Clasificación de áreas dentro del sitio del proyecto que son lo suficientemente similares para ser apropiadas para estrategias similares y tratamientos.

Vegetación. Conjunto de plantas propias de una zona o un lugar o existentes en un terreno determinado.

Vegetación primaria. Es aquella que no ha sufrido cambios significativos por las actividades humanas o perturbaciones naturales.

Vegetación secundaria nativa. Aquella vegetación forestal que surge de manera espontánea como proceso de sucesión o recuperación en zonas donde ha habido algún impacto natural o antropogénico.

Vida silvestre. Son los organismos que subsisten sujetos a los procesos de evolución natural y que se desarrollan libremente en su hábitat, incluyendo sus poblaciones menores e individuos que se encuentran bajo el control del hombre, así como los ferales.

Yema. Las estructuras encargadas del crecimiento del tallo que producen hojas y ramificaciones.

COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ruta de trabajo para el desarrollo del ciclo completo de la implementación de revegetación en la infraestructura carretera. 27

Figura 2. Dinámica de la sucesión ecológica en laderas. 35

Figura 3. Delimitación de perimetral de sitio de muestreo. 37

Figura 4. Delimitación de sitio de muestreo con el uso de cinta métrica. 38

Figura 5. Esquema representativo del sitio de muestreo. 38

Figura 6. Delimitación de sitio de muestreo utilizando GPS, cuerda, cinta métrica y estacas. 39

Figura 7. Esquema representativo de un sitio de referencia circular. 40

Figura 8. Esquema representativo de un sitio de muestreo cuadrado. 40

Figura 9. Muestreo mediante línea de intercepción o línea de Canfield. 42

Figura 10. Medición de diámetro normal con el uso de forcípula forestal. 43

Figura 11. Medición de altura de árboles con el uso de distanciómetro. 44

Figura 12. Zonificación del derecho de vía. 52

Figura 13. Secciones transversales típicas que ejemplifican los diferentes tipos de talud. 53

Figura 14. Área de cauce fluvial atravesada por la infraestructura carretera. 54

Figura 15. Camino de acceso habilitado para llegar al frente de trabajo. Autopista Silao, en el estado de Guanajuato. 56

Figura 16. Banco de material. Libramiento de Silao, en el estado de Guanajuato. 57

Figura 17. Planta de asfalto. Libramiento de Silao, en el estado de Guanajuato. 58

Figura 18. Bancos de tiro. Chalco, en el Estado de México. 58

Figura 19. Campamentos. General Escobedo, en el estado de Nuevo León. 59

Figura 20. Zona idónea para ser reforestada por su baja cobertura arbustiva y arbórea. 61

Figura 21. Rectificación de trazo de la carretera. 61

Figura 22. Restauración a gran escala y en mosaico generando gran variedad de agroecosistemas. 87

Figura 23. Áreas clave de intervención temática en la restauración productiva. 88

Figura 24. Revegetación de taludes con especies herbáceas. 97

Figura 25. Revegetación de taludes con especies herbáceas y arbustivas. 98

Figura 26. Revegetación de taludes con especies herbáceas y arbustivas, y reforestación con especies arbóreas. 99

Figura 27. Ejemplo de un corte revegetado con pasto tipo alfombra. Autopista México-Tuxpan, tramo Tejocotal-Nuevo Necaxa. 100

Figura 28. Ejemplo de estabilización de un corte revegetado con tulias. Autopista México-Tuxpan, tramo Tejocotal-Nuevo Necaxa. 101

Figura 29. Revegetación con especies herbáceas y arbustivas, y reforestación con especies arbóreas dentro del derecho de vía. 103

Figura 30. Reforestación con especies arbóreas en zona federal de cauces. 105

Figura 31. Ejemplo de área propuesta fuera del derecho de vía para las actividades de revegetación dentro de la CHF. 114

Figura 32. Revegetación con especies herbáceas y arbustivas en sitios abandonados por rectificación de trazo. 116

Figura 33. Rescate de plantas nativas del bosque mesófilo de montaña a lo largo del trazo de la autopista México-Tuxpan, tramo Tejocotal-Nuevo Necaxa, en el estado de Puebla. 118

Figura 34. Ejemplo de vivero rústico empleado para la propagación de árboles para la autopista México-Tuxpan, estado de Puebla. 122

Figura 35. Croquis de un vivero rústico para la propagación de plantas y cultivo de las plantas. 123

Figura 36. Organigrama del personal requerido para el funcionamiento de un vivero rústico. 124

Figura 37. Área de propagación establecida para la autopista México-Tuxpan. 124

Figura 38. Semillas de *Podocarpus reichi*, árbol del bosque mesófilo de montaña, el arilo rojo indica que las semillas han alcanzado su madurez. 128

Figura 39. Almacenamiento de semillas. 129

Figura 40. Germinación de semillas de *Pinus sp.*, en invernaderos y charolas. 131

Figura 41. Esquejes colectados. 135

Figura 42. Propagación por acodo. 138

Figura 43. Preparación de Tecnosol para el llenado de bolsas y trasplante. 141

Figura 44. Fertilización de ejemplares en vivero. 143

Figura 45. Fumigación para el control de plagas o enfermedades. 145

Figura 46. Raíces de *Quercus sp.*, inoculadas de manera natural con ectomicorrizas. 157

Figura 47. Poda de formaciones en especies arbóreas para concentrar el crecimiento de las plantas en un solo tallo. 158

Figura 48. Limpieza manual y mecanizada. 160

Figura 49. Material vegetal triturado que será utilizado en áreas a reforestar. 161

Figura 50. Apertura de brecha cortafuego. 162

Figura 51. Apertura de líneas negras. 163

Figura 52. Ejemplo de mensaje informativo para la prevención de incendios. 163

Figura 53. Ejemplos de habilitación de brechas individuales contra incendios. 164

Figura 54. Caso exitoso de la habilitación de brechas individuales contra incendios durante un incendio. 165

Figura 55. Ejemplo de protectores de árbol contra animales. 166

Figura 56. Ejemplo de cercado con piedra. 167

Figura 57. Ejemplo del cercado en el derecho de vía. 168

Figura 58. Ejemplo de cerco vivo. 170

Figura 59. Ejemplo de aplicación de hidrosiembra. 175

Figura 60. Ejemplo de aplicación de bancos semilleros. 176

Figura 61. Ejemplo de siembra al voleo. 177

Figura 62. Sucesión de una reforestación hasta la formación de un bosque maduro. 178

Figura 63. Marco real cuadrado. 179

Figura 64. Marco real rectagular. 180

Figura 65. Diseño tresbolillo. 181

Figura 66. Diseño de plantación con el método de agregación en islas, empleado en proyectos de restauración y recuperación ecológica. 183

Figura 67. Trazo de la plantación. 184

Figura 68. Marcaje de plantación (colocación de estacas). 184

Figura 69. Ejemplo de apertura de cepa separando en dos la excavación (izquierda) y herramientas manuales empleadas para abrir cepas (derecha). 187

Figura 70. Transporte de planta a sitios a revegetar. 188

Figura 71. Incorporación de silos de agua a la pared interna de la cepa. 189

Figura 72. Ejemplos de la conformación de cajetes en varios tipos de suelo. 191

Figura 73. Ejemplos de colocación de tutor. 192

Figura 74. Etiquetado de individuos plantados. 193

Figura 75. Ejemplo de aplicación de riego de asentamiento. 194

Figura 76. Ejemplo de aplicación de riego por mantenimiento. 199

Figura 77. Ejemplo de deshierbe por mantenimiento. 200

Figura 78. Ejemplo de poda de formación. 201

Figura 79. Ejemplo de aplicación de fertilizante en individuos establecidos en una revegetación. 202

Figura 80. Ejemplo de reconformación de cajetes con brechas cortafuego individual. 202

Figura 81. Ejemplo de corrección de tutor en las labores por mantenimiento. 203

Figura 82. Ejemplo de reposición de arbolado en áreas destinadas a la compensación ambiental por obras de infraestructura de caminos y vías férreas. 214

Figura 83. Evaluación del follaje del ejemplar. 225

Figura 84. Evaluación de la coloración de hojas del ejemplar. 226

Figura 85. Evaluación de la coloración del tallo del ejemplar. 227

Figura 86. Evaluación para detectar la presencia de plagas o enfermedades en las hojas del ejemplar. 228

Figura 87. Ejemplo de planta con buena adaptación (vigorosa). 229

Figura 88. Ejemplo de planta medianamente adaptada (vigor medio). 230

Figura 89. Ejemplo de planta no adaptada (vigor bajo). 231

Figura 90. Diagrama de decisión para un proyecto de revegetación en la infraestructura carretera. 241

Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de vegetación de México y la superficie potencial en la que se distribuyen. 17

Tabla 2. Términos utilizados para definir los objetivos específicos de la revegetación. 18

Tabla 3. Beneficios de la revegetación con especies nativas. 25

Tabla 4. Acciones de revegetación que pueden realizarse de acuerdo con las diferentes zonas de intervención. 32

Tabla 5. Tamaño (m^2) recomendado que pueden tener los cuadrantes para los trabajos de cuantificación de especies en los diferentes ecosistemas y estratos vegetales. 41

Tabla 6. Ejemplo de lista de especies vegetales obtenidas a partir de los muestreos de sitios de referencia, se utiliza para determinar la mezcla de especies y las cantidades de plantas a usar en cada unidad de revegetación. 50

Tabla 7. Clasificación de la profundidad fisiológica del suelo. 64

Tabla 8. Productividad de los suelos en función de la profundidad. 64

Tabla 9. Grado de descomposición de los agregados del suelo. 67

Tabla 10. Valores estimados de densidad aparente para suelo seco. 68

Tabla 11. Rangos por evaluar en la penetrabilidad de raíces en el suelo. 69

Tabla 12. Evaluación de los poros en el suelo. 70

Tabla 13. Clasificación de la concentración de materia orgánica en los suelos. 72

Tabla 14. Rangos de evaluación y especificaciones en las mediciones del pH. 73

Tabla 15. Cálculo de la reserva y la disponibilidad de nitrógeno en función del tipo de mantillo. 75

Tabla 16. Cálculo de la reserva y la disponibilidad de nitrógeno total y nitrógeno disponible. 75

Tabla 17. Cálculo del reservorio de fósforo a partir de la cantidad de humus que presenta el suelo. 76

Tabla 18. Cálculo de la cantidad de fósforo movilizable a partir de la mineralización de la materia orgánica del suelo. 76

Tabla 19. Ejemplo de lista de especies de plantas requeridas para un proyecto. 82

Tabla 20. Ejemplo de especies nativas que se considerarían en las actividades de revegetación con enfoque de sucesión ecológica. 94

Tabla 21. Características generales de la vegetación recomendada para cada tipo de área a ser intervenida con un proyecto de revegetación. 95

Tabla 22. Técnicas de revegetación recomendadas para áreas de cortes y terraplenes (taludes). 96

Tabla 23. Técnicas de revegetación recomendadas para el área libre de infraestructura permanente dentro del derecho de vía. 102

Tabla 24. Técnicas recomendadas para áreas de cauces fluviales. 104

Tabla 25. Técnicas recomendadas para caminos de acceso temporales. 106

Tabla 26. Técnicas de revegetación recomendadas para bancos de préstamo de materiales y plantas de trituración. 107

Tabla 27. Técnicas de revegetación recomendadas para áreas afectadas por plantas de asfalto. 109

Tabla 28. Técnicas de revegetación recomendadas para áreas afectadas por bancos de tiro. 110

Tabla 29. Técnicas de revegetación recomendadas para áreas afectadas por campamentos y patios de maquinaria. 112

Tabla 30. Técnicas de revegetación recomendadas para sitios propuestos como medida de compensación ambiental. 113

Tabla 31. Técnicas de revegetación recomendadas para áreas abandonadas por rectificación de trazo. 115

Tabla 32. Recomendaciones para definir la profundidad y el tamaño del cepellón en función del tamaño de la planta a rescatar. 120

Tabla 33. Ejemplos de regímenes de fertilización para las fases de crecimiento de las plantas en vivero. 144

Tabla 34. Ingredientes activos de insecticidas recomendados para el control de plagas. 152

Tabla 35. Ingredientes activos de fungicidas recomendados para prevenir y controlar infecciones. 154

Tabla 36. Densidad de reforestación por hectárea. 179

Tabla 37. Densidad de plantación de acuerdo con la distancia entre plantas en el trazo tresbolillo. 181

Tabla 38. Ejemplo de bitácora de campo para el registro de la plantación. 195

Tabla 39. Acciones de mantenimiento recomendado por época. 198

Tabla 40. Procedimiento del manejo integral de plagas y enfermedades forestales y sus medidas de control. 204

Tabla 41. Principales plagas en las plantaciones forestales y los sistemas de control. 207

Tabla 42. Indicadores del suelo que se propone evaluar después de los 5 años. 218

Tabla 43. Ejemplo de bitácora de campo para el mantenimiento y monitoreo de la revegetación. 235

Tabla 44. Desarrollo de un proyecto ejecutivo de revegetación. 238

COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

MANUAL DE REVEGETACIÓN
Y REFORESTACIÓN EN LA
INFRAESTRUCTURA CARRETERA

Primera edición. Se terminó de imprimir en el mes de diciembre de 2021 en *Grupo Átril, 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