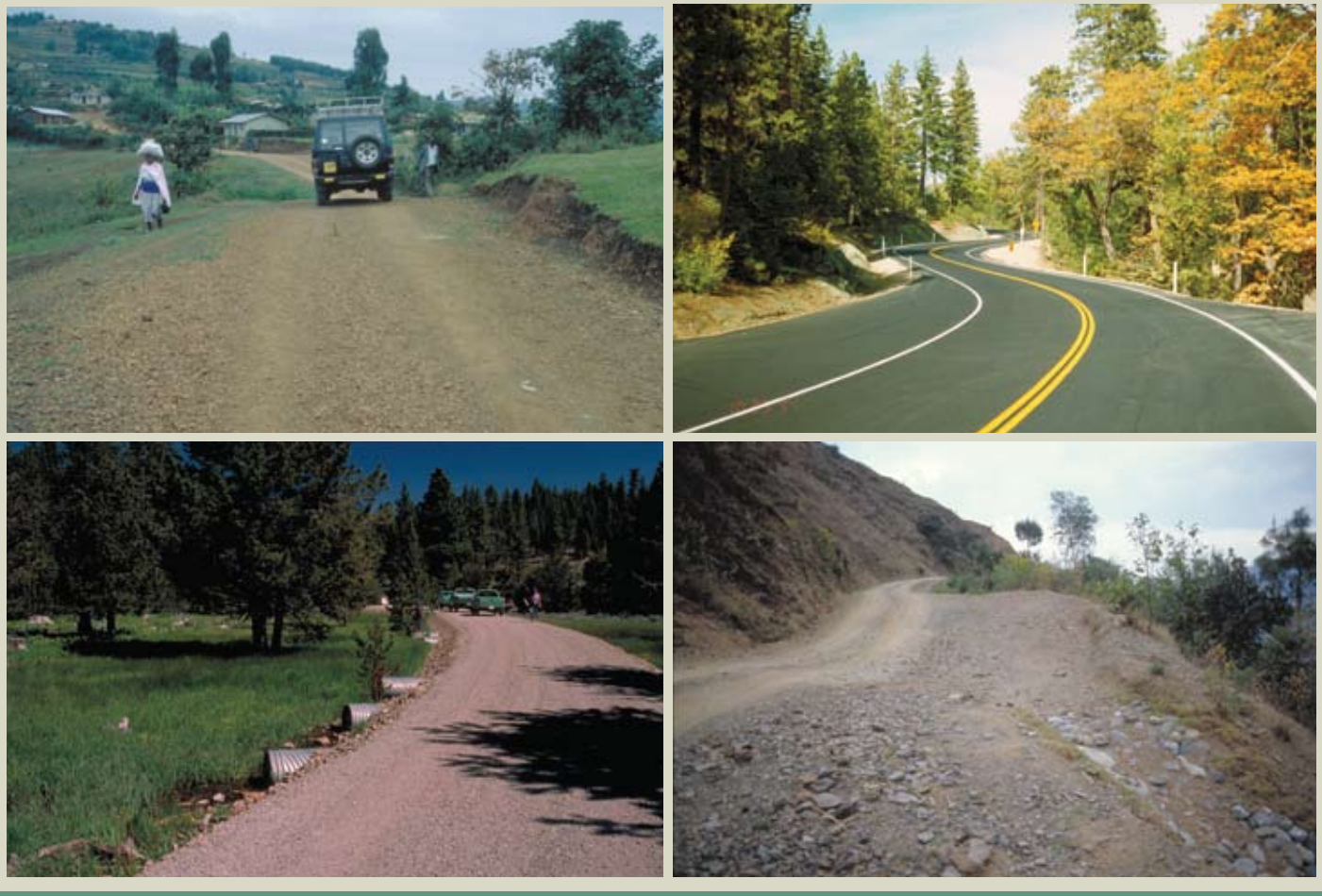
Ingeniería de Caminos Rurales



Guía de Campo para las Mejores Prácticas de Gestión de Caminos Rurales

Gordon Keller
&
James Sherar

Ingeniería de Caminos Rurales

Guía de Campo para las Mejores Prácticas de Gestión de Caminos Rurales

por

Gordon Keller, PE
Ingeniero Geotécnico
USDA, Forest Service
Plumas National Forest, California

y

James Sherar, PE
Ingeniero Forestal
USDA, Forest Service
National Forests of North Carolina

Producido por
US Agency for International Development (USAID)

En Cooperación con
USDA, Forest Service, International Programs
&
Conservation Management Institute,
Virginia Polytechnic Institute and State University

Versión en español producida por
Instituto Mexicano del Transporte
Secretaría de Comunicaciones y Transportes
México-2005

Revisado enero 2008

La información contenida en este documento ha sido desarrollada como una guía para los constructores y administradores de caminos, así como especialistas en recursos de la mayoría de las regiones geográficas, para ayudar a construir mejores caminos y con mayor relación costo-beneficio, considerando el mínimo impacto ambiental adverso y protegiendo la calidad del agua. El Departamento de Agricultura (USDA por sus siglas en inglés) o la Agencia para el Desarrollo Internacional (USAID por sus siglas en inglés) no asume ninguna resposabilidad por la interpretación o uso de esta información. El uso de nombres de firmas, comercios o corporaciones, es para la información y conveniencia del usuario. Dicho uso no constituye una evaluación oficial, conclusión, recomendación, aprobación o validación de ningún producto o servicio con la exclusión de otros que pudiesen ser adecuados.

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) prohibe la discriminación por raza, color, nacionalidad, edad, discapacidad, y donde se aplique sexo, estado civil, estado familiar, estado paternal, religión, orientación sexual, información genética, ideología política, represalias,o porque el total o parte de los ingresos de un individuo se deriven de cualquier programa de asistencia pública. (No todas las bases de prohibición se aplican a todos los programas). Aquellas personas con discapacidad que requieran medios alternativos para obtener información sobre los programas (tales como, sistema Braille, letra de tamaño grande,cinta de audio, etc.) deben comunicarse con el Centro TARGET del USDA al (202) 720-2600 (voz y dispositivos de telecomunicación para sordos [TDD]).

Para presentar una denuncia por discriminación, escriba a USDA, Director, Office of Civil Rights, 1400 Independence Avenue, S.W., Washington, D.C. 20250-9410 o llame al (800) 795-3272 (voz) o (202) 720-6382 (TDD). USDA es un proveedor y empleador con oportunidades iguales.

PRÓLOGO

Sin duda, los caminos rurales son elementos esenciales para el desarrollo social y económico de las comunidades humanas poco numerosas y, muchas veces, situadas en sitios montañosos o semidesérticos, en los que el acceso a los servicios básicos de salud y educación es muy complicado.

Si bien su construcción es indispensable, ésta debe planearse de manera respetuosa del medio ambiente, así como cumplir con una serie de requisitos técnicos que la faciliten y la economicen.

Tomando esto en cuenta y que una de las funciones sustantivas del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) es la capacitación del personal técnico que labora en el sector transporte, se tomó la decisión de aprovechar el ofrecimiento del Ing. Gordon Keller para publicar este libro, previa traducción del inglés al español por parte del propio IMT.

La versión original del libro fue publicada por los ingenieros Gordon Keller y James Sherar, con el titulo "Manual de Prácticas Mejoradas de Caminos Forestales", ha sido actualizada y complementada en muchos conceptos, por lo que para esta nueva versión en español, se considera que un título más adecuado sería el de "Ingeniería de Caminos Rurales", del cual me es muy grato escribir este prólogo.

Se considera que el contenido del libro, es un valioso auxiliar para los ingenieros que tienen que ver con los caminos rurales, desde la planificación, diseño, construcción y conservación, hasta su gestión y toma de decisiones, con el objetivo principal de contar con ese tipo de obras de infraestructura, previniendo, mitigando o evitando los impactos ambientales adversos que pudieran generarse.

Se incluye una definición de la terminología empleada, con esquemas y figuras explicativas, lo que facilita al lector de esta publicación su entendimiento. Dentro del contenido, se observa la importancia que los autores le dan a la planificación y proyecto del camino, con el fin de controlar o minimizar los impactos negativos, lo cual es indispensable para garantizar un desarrollo sustentable de las regiones que atravieza. Otro concepto que es fundamental en este tipo de obras, y que los autores enfatizan, es la consideración de un buen drenaje y subdrenaje, tanto para proteger la calidad del agua superficial y subterránea de la naturaleza, como para proteger la estructura del camino y su buen comportamiento a lo largo de su vida útil.

A lo largo de los capítulos del libro en cuestión, es grato observar diversas series de prácticas, las cuales son producto de la amplia experiencia de los autores en ese tipo de obras, conceptos que seguramente repercutirán en obras de mayor calidad, durables y con gran respeto al medio ambiente.

El libro inicia con un capítulo sobre normatividad en materia del impacto ambiental, así como la importancia de su cumplimiento para una adecuada planificación, considerando áreas vulnerables, potencial de desastres naturales, zonas de alto riesgo desde el punto de vista geotécnico e hidrología de detalle, acerca de las zonas de inundación y la correcta consideración del drenaje y subdrenaje para encauzar el agua a través de bordos de contención adecuados, alcantarillas y otras obras.

Más adelante se incluyen normas típicas para diseño de caminos rurales cubriendo aspectos geométricos, operacionales, volúmenes de obras, aspectos estructurales y costos. En la parte de hidrología se describen con detalle los métodos para cuantificar caudales de agua superficial y determinar sus correspondientes obras de drenaje, tomando en consideración áreas de influencia, intensidad de lluvias, coeficientes de escurrimiento, etc. No hay duda que los aspectos hidrológicos son fundamentales para el buen diseño de los caminos; se observa que los autores dan recomendaciones sobre enrocamientos, filtros adecuados

y geotextiles para mejorar el comportamiento del suelo, lo que demuestra la experiencia geotécnica del profesor Keller y su colaborador.

En cuanto a las obras de drenaje, los autores involucran el dimensionamiento apropiado, su instalación, los diferentes tipos de material para alcantarillas y las obras de arte complementarias para un buen acceso y salida del flujo hidráulico, con el fin de evitar la erosión, así como el material soporte de las mismas para evitar su falla. Se maneja la opción de vados y cruces de agua en épocas de estiaje, como una alternativa de menor costo para caminos de bajas especificaciones, en vez de grandes alcantarillas o puentes costosos.

Es de felicitar a los autores porque consideran un aspecto del que a menudo se minimiza su importancia; esto es, la estabilidad de cortes, terraplenes y taludes. Se recomienda en el libro una construcción balanceada para minimizar movimientos de tierra, con su impacto ambiental consecuente, y también se sugieren pendientes de talud para diferentes materiales, como rocosos, granulares o arcillosos, cubriendo medidas para estabilizar taludes, tanto en cortes como en terraplenes, tales como la revegetación, enrocamiento y geotextiles.

En cuanto a los materiales para este tipo de caminos, se analizan varias posibilidades que funcionan en estas obras, así como su estabilización con diferentes agentes como la cal, asfalto, cemento y aditivos para mejorar su comportamiento mecánico. En relación a los bancos de materiales para suministro de insumos del camino, se recomienda ampliamente su explotación racional y operación adecuada, minimizando los impactos al medio ambiente.

En el último capítulo se observan medidas para el control de la erosión, utilizando métodos físicos, de vegetación y biotécnicos, resaltando la importancia del fenómeno de erosión severa conocido como barranquillas, que debe controlarse para evitar su progresión, a través de un adecuado control del flujo del agua mediante cunetas, bermas, taludes externos, diques de contención, tablaestacados, gaviones o roca suelta.

Toda esta información está complementada con fotos de gran valor visual, que permiten al lector obtener una idea muy clara del contenido del libro en cada capítulo. Es de resaltar que a lo largo de los últimos cinco años, los asistentes a los Cursos Internacionales sobre Impactos Ambientales Generados por los Caminos Rurales que ha organizado el IMT, con alumnos de Centro y Sudamérica, de personal de la SCT, de Gobiernos Estatales e iniciativa privada, han expresado siempre elogios, tanto para el profesor Keller como para el material didáctico empleado.

Finalmente, considero que este libro en su versión en español, constituye una valiosa herramienta, tanto para fines académicos como para aplicaciones prácticas en la ingeniería de vías terrestres, y que seguramente cumplirá con el objetivo principal de mejorar los caminos rurales, con una adecuada planificación, diseño, construcción y conservación, protegiendo los recursos naturales.

Octavio A. Rascón-Chávez
Director General del IMT
Secretaría de Comunicaciones y Transporte
México

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la oportunidad de haber podido desarrollar esta guía para la *Agencia para el Desarrollo Internacional (USAID)* con la cooperación de *Servicio Forestal de los Estados Unidos, Oficina de Programas Internacionales*, y del *Conservation Management Institute (CMI)* de *Virginia Polytechnic Institute and State University*. La versión original de esta Guía, Prácticas Mejoradas de Caminos Forestales (BMP, por sus siglas en inglés) fue financiada por USAID/Honduras, en apoyo a su *Proyecto de Desarrollo Forestal (PDF)* y a su *Escuela Nacional de Ciencias Forestales (ESNACIFOR)*. Fue producida con la colaboración de Ramon Alvarez, Roberto Medina, y Atilio Ortiz con USAID en Honduras.

A partir de entonces, ha sido revisada y ampliada para servir de complemento y ser consecuente con el manual de capacitación titulado *"Minimum Impact Low-Volume Roads"* ("Caminos Rurales con Impactos Mínimos"), aplicado a obras de caminos en regiones en proceso de desarrollo.

La intención de esta Guía de Campo para las Mejores Prácticas en Gestión de Caminos Rurales es proporcionar una visión general de los aspectos clave relacionados con la planificación, ubicación, diseño, construcción y mantenimiento de caminos que pueden causar impactos ambientales negativos y enumerar las maneras más adecuadas de prevenir esos impactos. Las denominadas Mejores Prácticas de Gestión (MPG) (Best Management Practices, BMP) son técnicas o métodos de diseño las cuales, cuando se aplican, evitarán o disminuirán la contaminación y mantendrán la calidad del agua. Las prácticas BMP relacionadas con caminos han sido desarrolladas por muchos organismos, en vista de que la construcción de las mismas produce con frecuencia un importante impacto negativo en la calidad del agua y de que la mayoría de esos impactos se pueden evitar con buenas prácticas de ingeniería y de gestión. Los caminos que no tienen una buena planificación o que no se localizan correctamente, y que no se diseñan ni construyen debidamente ni tampoco se les da el mantenimiento adecuado, o que no están hechas con materiales durables, con frecuencia producen efectos negativos en la calidad del agua y en el medio ambiente.

En esta guía se presentan muchas de esas prácticas benéficas. Afortunadamente, muchas de estas "Mejores Prácticas en Gestión" también constituyen prácticas de ingeniería fiables que son además costo-efectivas al evitar las fallas y reducir las necesidades de mantenimiento y los costos de reparación. Por otro lado, debe tenerse en cuenta que el superlativo "mejor" es algo relativo ya que las prácticas adecuadas dependen en cierta medida de la ubicación o del país, del grado de necesidad de mejoras y de las leyes y reglamentaciones locales. Las mejores prácticas también evolucionan constantemente con el tiempo.

En esta guía se han intentado tomar en cuenta los aspectos más fundamentales de los caminos de una manera lo más sencilla posible. Los aspectos complejos deberán ser abordados por ingenieros y especialistas con experiencia. Se incluyen los conceptos clave de lo que debe hacerse (PRÁCTICAS RECOMENDADAS) y de lo que no debe hacerse (PRÁCTICAS QUE DEBEN EVITARSE) en el caso de caminos rurales, junto con información básica pertinente relacionada con el diseño. Estas prácticas fundamentales se aplican a caminos de todo el mundo y a una amplia gama de usos y estándares de los caminos. Con frecuencia se tienen que adaptar las prácticas recomendadas para satisfacer las condiciones locales y los materiales disponibles. Información adicional sobre CÓMO realizar el trabajo se puede encontrar en referencias específicas, tales como en el manual "Caminos Rurales con Impactos Mïnimos" *("Minimum Impact Low-Volume Roads Manual")*.

La mayor parte de las prácticas se aplica a un amplio rango de normas para caminos, desde caminos de un solo carril recubiertos con materiales del lugar hasta carreteras pavimentadas de doble carril. Entre las prácticas generales recomendadas se incluye una buena planificación y ubicación, el análisis de impacto ambiental, la necesidad de contar con drenaje superficial eficiente, las estructuras de drenaje transversales con las dimensiones adecuadas, taludes de cortes y terraplenes estables, aplicación de medidas de protección contra la erosión, y explotación de bancos de materiales y recuperación posterior de los terrenos.

Ciertas prácticas de diseño, tales como el uso de vados ondulantes superficiales, caminos con peralte hacia afuera, o cruces de arroyos en estiaje, son de aplicación práctica y muy redituables en cuanto a costo, pero en términos generales sólo se aplican a caminos rurales y de baja velocidad debido a restricciones de seguridad, aspectos relacionados con el alineamiento vertical, o retrasos inaceptables en el recorrido. Otros aspectos, tales como el uso de puentes con vigas de madera, resultan muy adecuados en regiones en vías de desarrollo para el cruce de arroyos a fin de evitar la circulación por el agua, aunque su uso no es recomendado por algunos organismos, como es el caso en nuestros días del Servicio Forestal de los Estados Unidos, debido a su corta vida útil y a su comportamiento potencialmente impredecible. Por lo tanto, la información que aquí se presenta se debe tomar en cuenta con base en las condiciones locales, los materiales disponibles, las normas para caminos, y las prioridades del proyecto o de los recursos, para luego aplicarse de manera práctica y segura donde así proceda.

Los reglamentos locales, las políticas o reglamentaciones de los organismos operadores, o las leyes pueden entrar en conflicto con cierta parte de esta información o pueden tener información más específica que la que aquí se incluye. Por lo tanto, se deben usar criterios adecuados al aplicar la información presentada en esta guía, y se deben respetar o modificar, en caso necesario, las leyes y reglamentos.

Usted puede reproducir o copiar cualquier parte de esta guía. Le pedimos darle crédito a esta guía como la fuente de información.

¡Se Recomienda Ampliamente la Reproducción de esta Guía de Campo!

Esta guía de campo no constituye una norma, especificación o regulación emitida por o de responsabilidad de algún grupo profesional, organismo, o entidad política. Su única intención es la de servir como guía para el diseño adecuado de caminos rurales y para la gestión correcta de éstos, tomando como base el criterio profesional y la experiencia de los autores.

Un gran número de individuos han participado en el desarrollo de la versión original de “Caminos Rurales con Impactos Mínimos” y esta segunda versión “Ingeniería de Caminos Rurales, Guía de Campo sobre las Mejores Prácticas de Gestión de Caminos Rurales”. Estos individuos han tenido la visión y compromiso de preservar y mejorar la calidad de nuestro ambiente reconociendo al mismo tiempo la necesidad de buenos caminos. Además, ellos reconocen la importancia en la planificación, diseño, mantenimiento, y gestión en general necesaria para tener buenos caminos. Los fondos para este segundo proyecto han sido provistos principalmente por la Agencia de Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (USAID), la Agencia Global (Global Bureau), y el Grupo Forestal, con la contribución del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), el Servicio Forestal, la Oficina de Programas Internacionales, La Región Pacífico Sur Oeste y el Plumas National Forest.

Los autores están particularmente agradecidos por el apoyo de Jerry Bauer, Alex Moad, Margaret Haines, Liz Mayhew y Michelle Zweede con la oficina de Programas Internacionales del Servicio Forestal de los Estados Unidos (USFS); Jim Padgett y Nelson Hernandez de USFS, Oficina de Washington, Scott Lampman, Paul DesRosiers, y Mike Benge de USAID, y el permanente y efectivo apoyo de los colegas del Plumas National Forest.

Los dibujos presentados en este documento vienen de una variedad de fuentes, como se ha indicado, y la mayoría han sido re-dibujados o adaptados con el talento artístico de Jim Balkover, Ilustrador, y Paul Karr, ingeniero retirado del Servicio Forestal. Trabajos de scan, título y sellos de gráficas y gestión computacional de figuras para esta guía de campo han sido logrados gracias a las capacidades y paciencia de Lori Reynolds de Reynolds Graphics en Quincy, California. Traducciones de porciones de esta Guía de Campo y del Manual original de Caminos Rurales con Impactos Mínimos y revisiones fue hábilmente lograda por la Ingeniera Alejandra Medina, MSE, Senior Research Associate del Instituto de Transporte de Virginia Tech, y Sylvana Ricciarini, MSC, Ingeniera Civil.

Sinceros agradecimientos a aquellos profesionales y otras personas interesadas quienes contribuyeron con su tiempo en revisar y editar el documento, como también en hacer sugerencias valiosas relacionadas con la forma y el contenido de esta guía de campo. Gracias en particular a Jill Herrick, del USFS, por sus valiosas contribuciones y asistencia en la edición de esta guía y en la definición de términos y referencias, y revisión general de contenido. De igual forma, gracias a Michael Furniss, Charlie Carter, Jerry Short, Tim Dembosz, y Ozzie Cummins, for sus numerosas sugerencias e ideas sobre drenaje y otros aspectos. Gracias a Richard Wiest, autor de "A Landowner's Guide to Building Forest Access Roads", en español, "Guía para Propietarios de Tierras para la Construcción de Caminos de Acceso Forestal", por su inspiración e ideas sobre formato y estructura. Otros participantes en la revisión y edición incluyen Leslie Lingley de Leslie Geological Services; Marty Mitchell de Clear Water West; Alfred Logie con la Oficina de Programas Internacionales de la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos, Federal Highway Administration (FHWA); Mike Benge y Eric Peterson con USAID; Dr. John Metcall de LSU/PIARC World Roads Association (Asociación Mundial de Carreteras); Dr. Francis Greulich, Ingeniero Forestal de University of Washington; Dr. Allen Hathaway, Ingeniero Geológico de la Universidad de Missouri-Rolla; David Orr, PE con el Programa de Carreteras Locales de Cornell University; Prof. Raymond Charles, University of West Indes; Art Klassen, Tropical Forestry Foundation; James Schenck y Wilson Castaneda, Cooperative Housing Foundation-Guatemala; Harold Tarver con Africare; Wes Fisher con Tellus Institute; y Sandra Wilson-Musser, Corky Lazzarino, Armando Garza, Gary Campbell, Ken Heffner, Terry Benoit, Allen King, John Heibel, William Vischer, y Grez Watkins, empleados de USFS dedicados a la protección de cuencas y la construcción de caminos bien planificados, diseñados y construídos.

La mayoría de fotos utilizadas en este manual pertenecen a los autores Gordon Keller y James Sherar, o a Jerry Bauer, Coautor del Manual de Caminos Rurales con Impactos Mínimos. Otras fotos pertenecen a individuos que se indican en la foto específica. La foto del muro de retención de la portada fue proporcionada por Michael Burke.

Los autores desean agradecer a Tom Hammett en Virginia Tech por sus conexiones y gestiones en este proyecto y a Julie McClafferty de Conservation Management Institute y Patty Fuller de Poplar Hill Studios en Blacksburg, Virginia, por su arte en la estructura y publicación de la versión en Inglés de esta guía, y su presentación. Esta version revisada en español fue realizada con la colaboración de Mario Chocooj del Servicio Forestal de Estados Unidos, Región 5. Finalmente, pero por ningún motivo lo último, un gran abrazo a nuestras esposas, Jeannette y Julie, y nuestras familias por su paciencia y apoyo en este proyecto.

Desde 1992 el profesor Ing. Gordon Keller ha participado en los Cursos Internacionales sobre Impacto Ambiental Generado por la Infraestructura Carretera, impartiendo cátedras y prácticas de campo sobre los caminos rurales. Para ello, el citado profesor utilizó apuntes y primeras versiones de sus libros titulados "Caminos Rurales con Impactos Mínimos" e "Ingeniería de Caminos Rurales, Guía de Campo Para las Mejores Prácticas de Gestión de Caminos Rurales."

A partir del año 2001, el profesor Keller y su coautor el Ing. James Sherar, se abocaron a la revisión y actualización de la versión original escrita en el idioma inglés, entableciéndose una contínua comunicación entre los autores y el Instituto Mexicano del Transporte, para realizar una traducción al español de la última versión.

Durante el año 2002 el Instituto Mexicano del Transporte se abocó a la traducción de la versión mejorada, trabajo que efectuó el Ing. Raúl Esquivel Díaz, consultor del IMT. Posteriormente los ingenieros Rodolfo Téllez Gutiérrez y Sandra Torras Ortiz, de la Coordinación de Infraestructura y Área de Medio Ambiente del IMT, respectivamente, realizaron una revisión detallada del material, para utilizar terminología y conceptos adecuados en el medio de carreteras mexicanas y otros países latinoamericanos.

Esta tercera versión, es resultado de la actualización y mejora de versiones anteriores en español. Ha sido cuidadosamente revisada y cuenta con un diseño más amigable para el usuario, lo que facilitará su comprensión y uso.

ÍNDICE

Prólogo iii

Agradecimientos v

Definición de Términos xi

Capítulo 1 Introducción 1

Capítulo 2 Análisis Ambiental 5

Capítulo 3 Aspectos de Planificación y Aplicaciones Especiales 11
Aspectos Claves Relacionados con los Caminos
Reducción de la Vulnerabilidad ante Desastres Naturales
Administración de Zonas Protectoras de Agua
Explotación Maderera

Capítulo 4 Ingeniería de Caminos Rurales 23
Planificación de Caminos
Ubicación de Caminos
Levantamiento topográfico, Diseño y Construcción de Caminos
Costo de Caminos
Mantenimiento de Caminos
Cierre de Caminos

Capítulo 5 Hidrología para el Diseño de Cruces de Drenaje 39

Capítulo 6 Herramientas para Diseño Hidráulico y de Caminos 45

Capítulo 7 Drenaje para Caminos Rurales 55
Control del Drenaje Superficial de Caminos
Control de Entradas y Salidas de Drenes y Cunetas Transversales
Cruces de Arroyos Naturales
Cruces de Zonas Inundadas y de Praderas; Uso de Subdrenaje

Capítulo 8 Uso, Instalación y Dimensionamiento de Alcantarillas 77

Capítulo 9 Vados o Cruces en Estiaje 93

Capítulo 10 Puentes 99

Capítulo 11 Estabilización de Taludes y Estabilidad de Cortes y Rellenos 105

Capítulo 12 Materiales para Caminos y Bancos de Materiales 117

Capítulo 13 Control de la Erosión 131

Capítulo 14 Estabilización de Quebradas 143

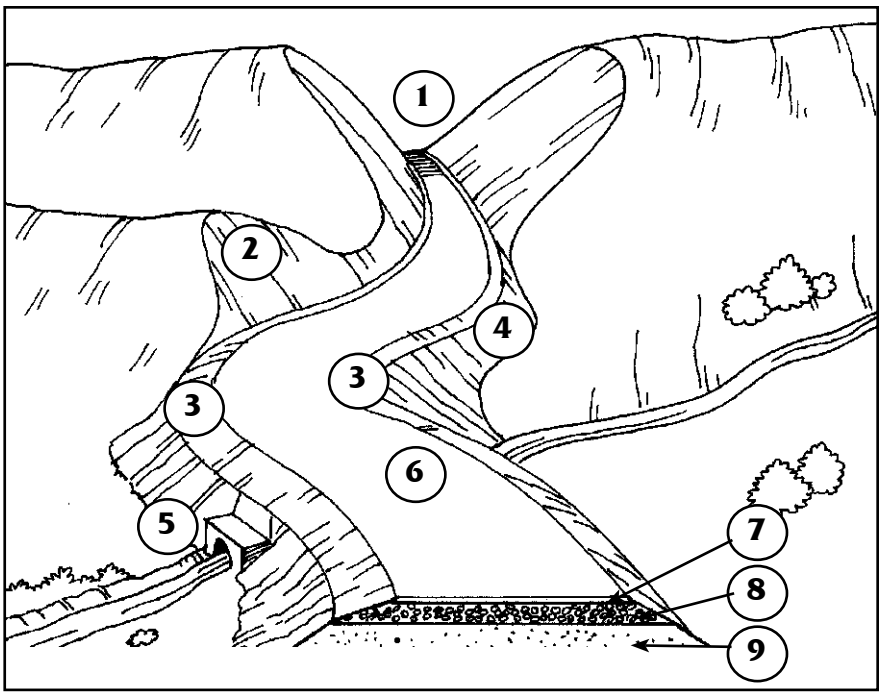
Referencias Seleccionadas 149

Ordenados por Tema:

Sección I	**Componentes del Camino**	**ix**
Sección II	**Sección Estructural y Materiales del Camino**	**xii**
Sección III	**Drenaje Superficial**	**xiii**
Sección IV	**Alcantarillas y Cruces de Drenaje**	**xv**
Sección V	**Vados o Cruces en Estiaje**	**xvii**
Sección VI	**Control de la Erosión**	**xviii**
Sección VII	**Términos Varios**	**xxi**

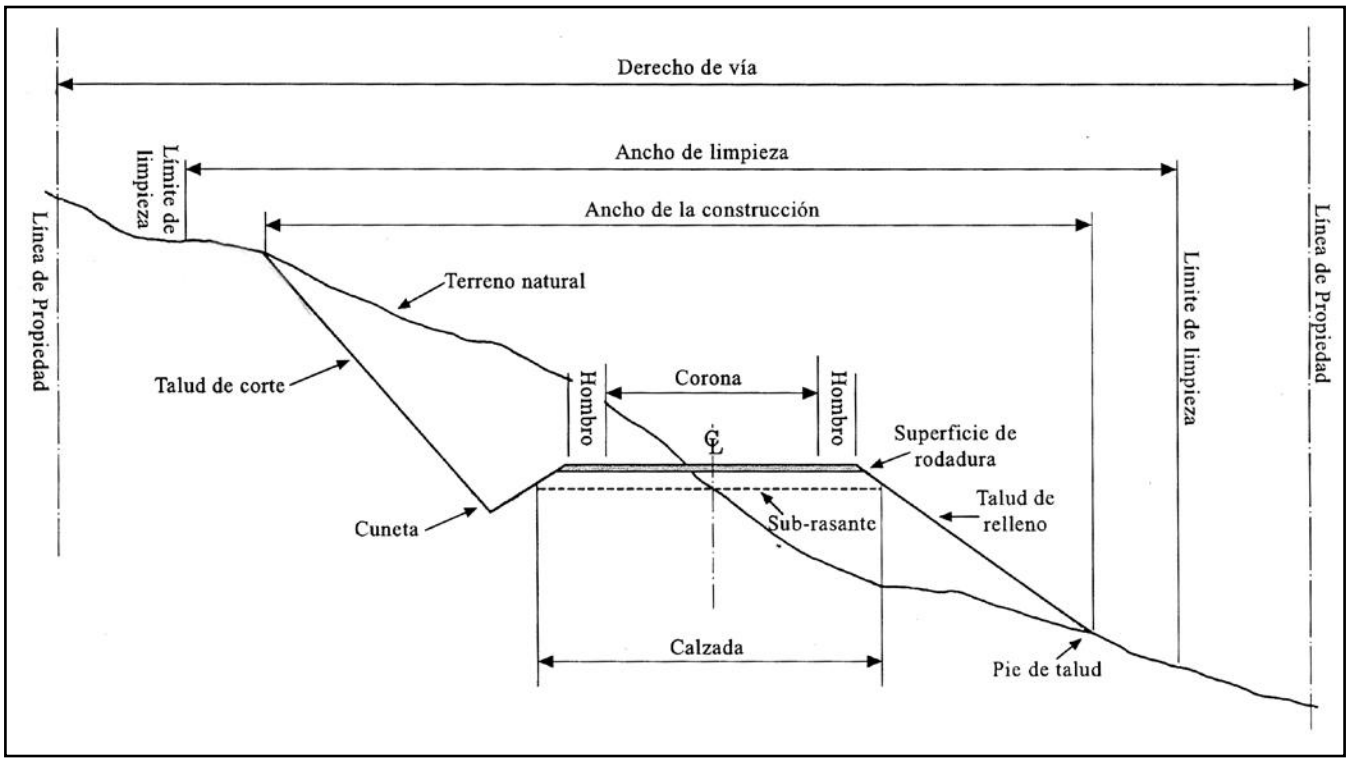
I. Componentes del Camino

Figura I.1 Términos Usados para Definir a los Caminos Rurales



1. Camino a través de corte
2. Talud de Corte (Talud Exterior)
3. Acotamiento
4. Talud de Relleno (Terraplén)
5. Alcantarilla
6. Carriles de Circulación
7. Superficie de Rodadura
8. Capa de Base
9. Subrasante

Figura I.2 Términos Usados para Definir a los Caminos Rurales (Sección Transversal)



Acotamiento (Hombro, Banquina) (*Shoulder*) – Franja pavimentada o no pavimentada a lo largo del borde de los carriles de circulación del camino. Un acotamiento interior está junto al corte en talud. Un acotamiento exterior está junto al talud de un terraplén.

Ancho del terraplén (*Roadbed*) – Ancho de la calzada recorrida por los vehículos incluidos los acotamientos, medido en la parte superior de la subrasante.

Ancho total del camino (Límites de construcción o Ancho de formación) [*Roadway (Construction Limits or Formation Width*)] – Ancho horizontal total del terreno afectado por la construcción del camino, desde la parte superior del corte en talud hasta el pie del relleno o de la zona con pendientes uniformes.

Berma (*Berm*) – Camellón de roca, suelo o asfalto generalmente a lo largo del borde exterior del acotamiento del camino, usado para controlar el agua superficial. Encauza el escurrimiento superficial a lugares específicos donde el agua se puede eliminar de la superficie de rodadura sin producir erosión.

Camino a través de corte (*Through Cut*) – Camino cortado a través del talud de una ladera o, más frecuentemente, de una loma, en la cual existe un corte en talud a ambos lados del camino.

Camino rural (*Low-Volume Road*) – Un tipo de sistema de transportación que se construye generalmente para manejar o explotar recursos de zonas rurales o no desarrolladas. Estos sistemas únicos en su género han sido diseñados para soportar volúmenes bajos de tránsito con cargas por eje potencialmente extremas. Se les define comúnmente dentro del rango de menos de 400 TPDA (Tránsito Promedio Diario Anual).

Camino sobre terraplén (*Through Fill*) – A diferencia de un corte, un relleno es un segmento de camino formado por material de relleno, con taludes de terraplén a ambos lados de la calzada.

Capa de base (*Base Course*) – Véase la Sección II más adelante.

Carriles de circulación (*Calzada) [Traveled Way (Carriageway*)] – Parte del camino construida para la circulación de vehículos en movimiento, incluidos los carriles de tránsito y los apartaderos de paso (se excluyen los acotamientos).

Contrafuerte o machón (*Buttress*) – Estructura diseñada para resistir empujes laterales. Generalmente se construye a base de enrocamiento de protección, gaviones o suelo drenado, para soportar el pie de un talud en una zona inestable.

Corte en balcón y transporte al sitio final (*Full Bench Cut and End Haul*) – Método de construcción de caminos en el cual se construye el camino recortando todo el talud y acarreando todo el material sobrante (transporte longitudinal) hasta un basurero fuera del sitio de la obra.

Corte y relleno (*Cut-and-fill*) – Método para construir caminos en el cual los caminos se construyen al cortar una ladera y extender los materiales excavados en lugares adyacentes bajos y como material compactado o a volteo para rellenos en talud a lo largo de la ruta. En un "corte y relleno balanceado" ("balanced cut-and-fill") se utiliza todo el material "cortado" para construir el "relleno". En un diseño de corte y relleno balanceado no se tiene material sobrante en exceso y no hay necesidad de acarrear material de relleno adicional. Con esto se minimiza el costo.

Cuneta (Dren lateral) [*Ditch (Side Drain)*] – Canal o zanja poco profunda a lo largo del camino para colectar el agua del camino y del terreno vecino y transportarla hasta un punto adecuado para eliminarla. Generalmente se ubica a lo largo del borde interior del camino. Puede localizarse a lo largo del borde exterior o a lo largo de ambos lados del camino.

Derecho de vía (*Right-of-Way*) – Franja de terreno sobre la cual se construyen obras tales como caminos, vías de ferrocarril o líneas de energía eléctrica. Legalmente constituye una servidumbre que otorga el derecho de paso sobre el terreno de otra persona.

Eje del camino (*Road Center Line*) – Línea imaginaria que corre longitudinalmente a lo largo del centro del camino.

Estructura de retención o de contención (*Retaining Structure*) – Estructura diseñada para resistir desplazamientos laterales del suelo, agua, u otro tipo de material. Se emplea comunmente como apoyo de la calzada o para ganar anchura del camino en terrenos escarpados. Con frecuencia se construyen usando gaviones, concreto reforzado, encofrados de madera o tierra estabilizada mecánicamente.

Pendiente (Gradiente) [*Grade (Gradient)*] – Inclinación de la rasante del camino a lo largo de su alineamiento. Este talud se expresa en porcentaje –la relación entre el cambio en elevación y la distancia recorrida. Por ejemplo, una pendiente de +4% indica una ganancia de 4 unidades de medición en elevación por cada 100 unidades de distancia recorrida medida.

Relación de talud (Talud) [*Slope Ratio (Slope)*] – Una forma de expresar los taludes construidos en función de la relación entre la distancia horizontal y el ascenso vertical, como por ejemplo 3:1 (3 m horizontales por cada 1 m de ascenso o descenso vertical).

Relleno de Hendiduras [Relleno de Astillas] (*Sliver Fill*) – Una pequeña cuña de material de relleno que se encuentra casi paralela a la pendiente de la montaña, típicamente sobre pendientes superficiales de más de 60%. Se establecen en forma de una cuña delgada cuando el material suelto cae al pie de taludes inclinados, y no como las masas de relleno más gruesas ubicadas en pendientes más planas,. Son muy difíciles de compactar en pendientes que exceden un 45%. Los rellenos de astillas deben evitarse ya que frecuentemente son inestables.

Relleno lateral a volteo (*Side-Cast Fill*) – Material excavado vaciado sobre un talud preparado o natural junto a la excavación para construir el cuerpo del terraplén. El material generalmente no se compacta.

Relleno reforzado (*Reinforced Fill*) – Relleno en el que se ha colocado refuerzo trabajando a tensión mediante el contacto por fricción con el suelo circundante con la finalidad de mejorar la estabilidad y la capacidad de carga. Los rellenos reforzados están formados por suelo o por materiales rocosos colocados en capas con elementos de refuerzo para formar taludes, muros de contención, terraplenes, presas y otro tipo de estructuras. Los elementos de refuerzo varían desde una simple vegetación hasta productos especializados tales como tiras metálicas, emparrillados de acero, geomallas de polímeros y geotextiles.

Sección transversal (*Cross-Section*) – Dibujo en el que se muestra una sección del camino cortada a todo lo ancho del camino (véase la Figura i.2 anterior). También se puede aplicar a un arroyo, a un talud, a un deslizamiento, etcétera.

Subrasante (*Subgrade*) – Véase la Sección II más adelante.

Superficie de Rodadura (Rodamiento, Revestimiento superficial) [*Surface Course (Surfacing)*]) - Véase la Sección II más adelante.

Talud de corte (talud exterior o corte marginal) [*Cut Slope (Back Slope or Cut Bank)*] – La cara artificial o el talud cortado en suelo o en roca a lo largo del borde interior del camino.

Talud del relleno (Talud del terraplén) [*Fill Slope (Embankment Slope)*] – Talud inclinado que abarca desde el borde exterior del acotamiento del camino hasta el pie (parte inferior) del relleno. Esta es la superficie que se forma donde se deposita el material para la construcción del camino.

Terraplén (Relleno) [*Embankment (Fill)*] – Material excavado que se coloca sobre la superficie de un terreno preparado para construir la subrasante del camino y la plantilla de base del camino.

Terreno natural (Nivel del terreno natural) [*Natural Ground (Original Ground Level)*] – La superficie del terreno natural que existía antes de la afectación y/o de la construcción del camino.

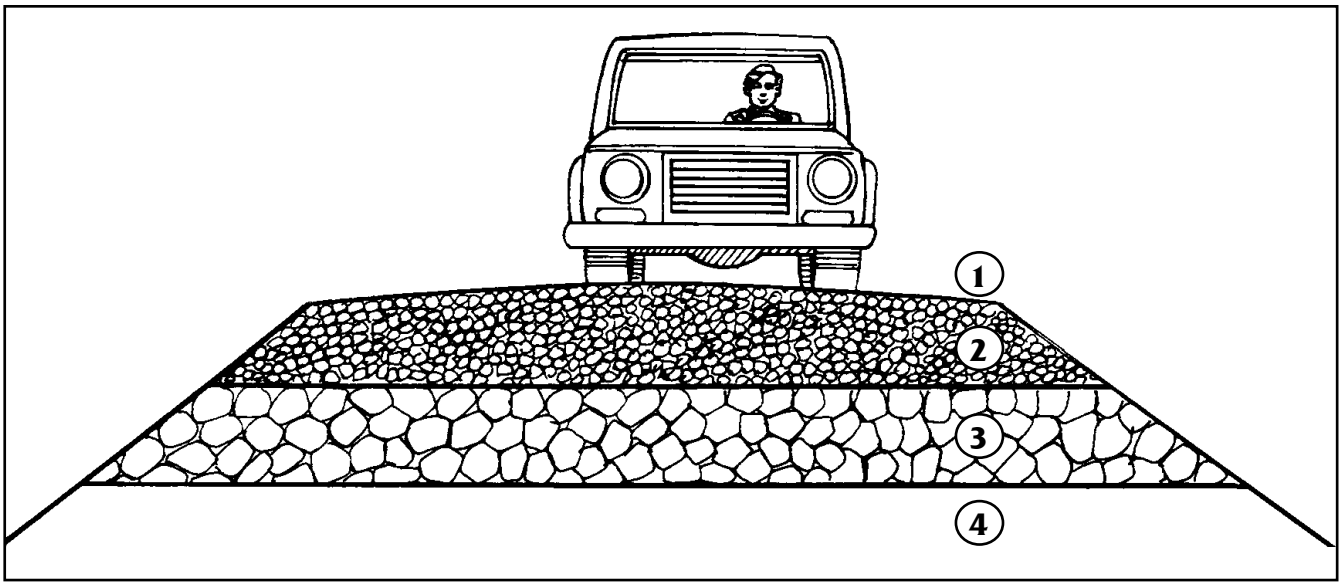
Tierra Estabilizada Mecánicamente (Suelo Reforzado, Tierra Armada) [*Mechanically Stabilized Earth (MSE), Reinforced Soil, Geosynthetically Reinforced Soil (GRS)*] – Los suelos reforzados o estabilizados mecánicamente son un tipo de estructura de retención formada con material de reforzamiento ubicado en capas entre suelo compactado o agregado. Entre los materiales reforzados usados comúnmente se encuentran geotextiles, geomallas, mallas soldadas y tejidas, franjas de metal, etc. Las estructuras o materiales de muro de fachada usados incluyen bloques de concreto y paneles, madera, gaviones, malla soldada, el geotextil mismo, etc.

Transporte al sitio final (*End Haul*) – La remoción y acarreo del material excavado fuera del sitio de la obra hasta una zona estable de desecho (en vez de colocar el material de relleno cerca del lugar de excavación).

Vista en planta (Levantamiento cartográfico) [*Plan View (Map View)*] – Vista tomada desde el cielo hacia el terreno. Un plano con esta vista es semejante a lo que podría ver un ave al volar sobre el camino.

II. Sección Estructural y Materiales del Camino

Figura II Sección Estructural del Camino



1. Revestimiento Superficial (Capa de Rodadura)
2. Capa de base
3. Sub-base
4. Subrasante

Banco de préstamo (Sitio de préstamo) [*Borrow Pit (Borrow Site)*] – Zona en la que se ejecutan excavaciones para producir materiales para obras térreas, tales como material de relleno para terraplenes. Generalmente es una zona pequeña que se usa para explotar arena, grava, roca o suelo sin ningún procesamiento posterior.

Camino de Troncos (Camino Esterillado, Camino Empuentado) [*Corduroy Road*] – Una sección estructural del camino soportada por troncos de diámetro pequeño a grande, usualmente ubicados perpendiculares a la dirección del camino, cruzando pantanos, humedales o áreas de suelo blando. Los troncos son cubiertos con suelo o agregado para formar la superficie de la vía. Es comúnmente utilizado en caminos temporarios o de bajo uso y tiene una vida útil relativamente corta (5 a 20 años).

Cantera (*Quarry*) – Sitio donde se explota piedra, enrocamiento de protección, agregados, y otros materiales de construcción. Con frecuencia el material debe ser excavado mediante escarificado o con explosivos, y el material es generalmente procesado mediante trituración o cribado para producir la granulometría especificada para el agregado.

Capa de base (Base) [*Base Course (Base)*] – Ésta es la capa principal de transmisión de cargas en los carriles de circulación. El material de la capa de base está constituido normalmente por piedra triturada, o grava, o suelos con grava, roca intemperizada, arenas y arcillas arenosas estabilizadas con cemento, cal o asfalto.

Capa de rodadura (Superficie de rodadura, Rodamiento) [*Wearing Course (Wearing Surface)*] – Es la capa superior de la superficie del camino sobre la cual circulan los vehículos. Deberá ser durable, podrá tener una alta resistencia al resbalamiento y, en general, deberá ser impermeable al agua superficial. Las superficies de rodadura podrán ser construidas con el material local, agregados, capas selladoras o asfalto

Capa superficial (Revestimiento superficial) [*Surface Course (Surfacing)*] – Es la capa superior de la superficie del camino, llamada también superficie de rodadura. Entre los materiales de revestimiento usados para mejorar el confort del conductor, para proporcionar apoyo estructural y para impermeabilizar la superficie del camino a fin de usarse en la temporada de lluvias, está la roca, cantos rodados, agregados triturados y pavimentos, tales como tratamientos superficiales bituminosos y concreto asfáltico.

Desmoronamiento (*Raveling*) – Proceso en el cual el material grueso de la superficie del camino se suelta y se separa de la base del camino debido a falta de ligante o a una granulometría pobre del material. El término también se aplica a un talud en el cual la roca o el material grueso se afloja y rueda por el talud del corte o del relleno.

Ondulaciones (Corrugaciones) [*Washboarding (Corrugations)*] – Una serie de lomos y depresiones a través del camino causados en caminos con superficies de suelo y de agregados como resultado de la falta de cohesión superficial. Éste es generalmente el resultado de la pérdida de finos en la superficie del camino debida a condiciones secas o a materiales pobremente graduados. Estas condiciones empeoran con las velocidades excesivas de los vehículos y con los altos volúmenes de tránsito.

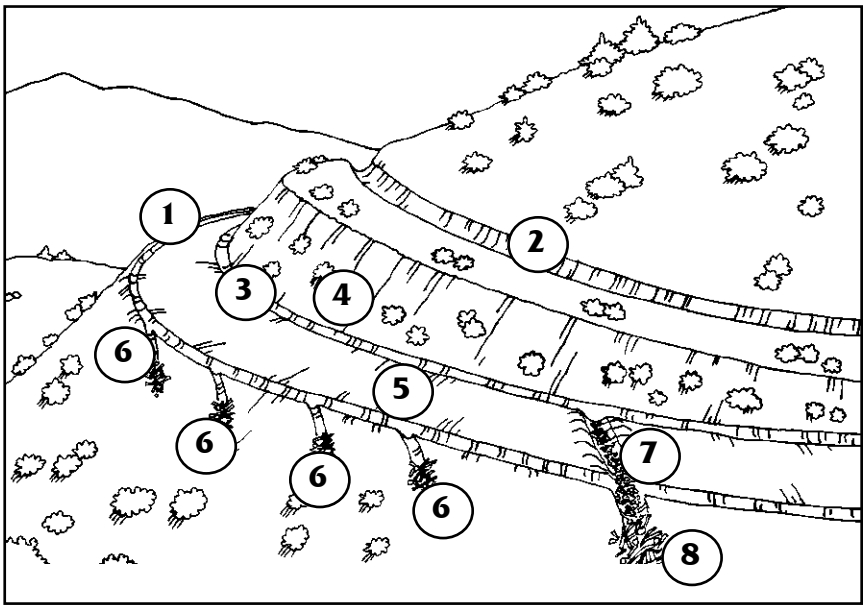
Subbase (*Sub-Base*) – Esta es la capa secundaria de distribución de la carga y que subyace a la capa de base. Normalmente está constituida por un material que tiene una menor resistencia y durabilidad que la del material usado en la base, por ejemplo, grava natural sin procesar, grava y arena o una mezcla de grava, arena y arcilla.

Subrasante (*Subgrade*) – La superficie del cuerpo del terraplén sobre la cual se colocan las capas de subbase, base o superficie de rodadura. En el caso de caminos sin una capa de base o sin capa superficial, esta parte del cuerpo de terraplén se convierte en la superficie final de rodadura. La subrasante está generalmente al nivel del material *in situ*.

Valor Relativo de Soporte (CBR) (California Bearing Ratio) [*CBR (California Bearing Ratio)*] – Es un método usado ampliamente para determinar el valor relativo de carga o fortaleza de los materiales de la subrasante. Es una medida de la resistencia del suelo a la penetración, comparada con aquella de la piedra triturada. El CBR es función de la textura, contenido de agua y densidad compactada del suelo. Fue desarrollado originalmente por la División de Carreteras de California (California División of Highways), de los Estados Unidos de América, y es actualmente usado a nivel mundial para diseño de pavimentos.

III. Drenaje Superficial

Figura III.1 Drenaje Superficial del Caminos



1. Cuneta Exterior (usualmente raro!)
2. Cuneta de captación de agua en la parte superior del talud
3. Cuneta Interior
4. Talud de Corte
5. Camino
6. Cunetas de Salida
7. Vado ondulante superficial
8. Maleza para control de erosión

Caballón desviador (Camellón) [*Waterbar*] – Dispositivo artificial de drenaje frecuentemente colocado a ciertas distancias entre sí dejando montículos de suelo sobre la superficie del camino que interrumpen el flujo de agua y que la desvían fuera de la superficie de la calzada. Se puede circular sobre ellos con vehículos de rodada alta o de lo contrario constituirán un paso infranqueable.

Coraza (Enrocada, Revestimiento) [*Armor*] – Rocas u otro tipo de material que se colocan en muros cabeceros, en suelos, o en cunetas para evitar que el agua erosione y socave o arrastre el suelo.

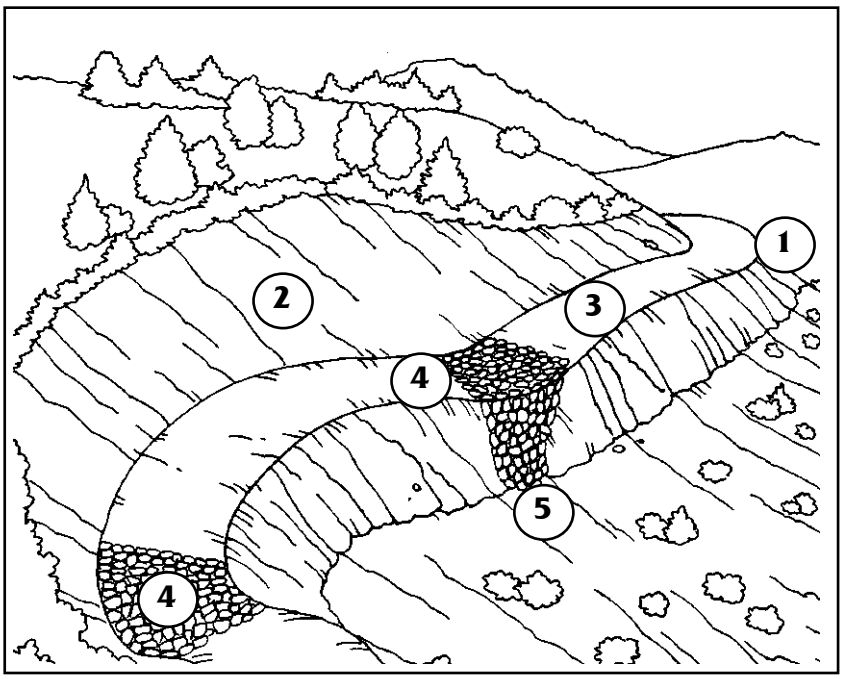
Corona (*Crown*) – Una superficie coronada tiene la mayor elevación al centro de línea (convexa) y tiene pendientes descendentes a ambos lados. La corona se usa para facilitar el drenaje del agua en una superficie de camino amplia.

Cuneta de Captación de Agua o Cuneta de Coronamiento (Dren de intercepción) [*Catch Water Ditch (Intercept Drain)*] – Excavación o zanja de fondo plano o cuneta ubicada por arriba de un talud del corte que se diseña para interceptar, captar y drenar el agua que escurre superficialmente antes de que pase sobre el talud del corte, cuyo objetivo es proteger el talud del corte y la calzada contra la erosión.

Cunetas de salida (Desvíos, Cuneta exterior o Drenes de inglete) [*Lead-Off Ditches (Turnouts, Outside Ditch, or Mitre Drains)*] – Excavaciones diseñadas para desviar el agua fuera de la cuneta y de la calzada (en un punto donde esto no ocurra naturalmente) con el fin de disminuir el volumen y la velocidad del agua que escurre por las cunetas a lo largo del camino.

Desagüe de piedra en zanja (subdren) [*French Drain (Underdrain)*] – Zanja enterrada rellena con agregado grueso y usualmente colocada en la línea de la cuneta a lo largo del camino, que tiene la función de drenar el agua subterránea de una zona húmeda y de descargarla en un lugar seguro y estable. Para la construcción de estos desagües se podrá usar roca de diversos tamaños pero no cuentan con una tubería de drenaje en el fondo de la zanja. Véase Figura (III.2) en siguiente página.

Figura III.2 Desagüe de piedra en zanja (subdren)



1. Talud del relleno
2. Talud del corte
3. Camino
4. Vados ondulantes superficiales
5. Descarga protegida con enrocamiento

Dren Transversal (de Alcantarilla) [*Cross-Drain (X-Drain)*] – Estructuras instaladas o construidas como pueden ser las alcantarillas y los drenes transversales empedrados, que conducen el agua de un lado del camino al lado contrario.

Enrocamiento de protección (Zampeado) (*Riprap*) – Fragmentos grandes y durables de roca bien graduada idealmente con superficies fracturadas, con tamaños adecuados para resistir la socavación o el movimiento por el agua, los cuales se colocan para evitar la erosión del suelo nativo en el sitio.

Escombro (Arrastre) (*Debris*) – Materia orgánica, rocas y sedimentos (hojas, maleza, madera, rocas, escombros, etc.) con frecuencia entremezclados, que se considera indeseable (en un canal o en una estructura de drenaje).

Estructura de detención (Dique o Control de Socavación) [*Check Dam (Scour Check, or Gully Control Structure)*] – Presa pequeña construida en una garganta o zanja para disminuir la velocidad del flujo, para minimizar la socavación en el canal y para atrapar sedimentos.

Estructura de drenaje (*Drainage Structure*) – Estructura instalada para controlar, desviar o conducir el agua hacia fuera o a través de un camino, incluyendo pero no limitándose a alcantarillas, puentes, zanjas de drenaje, vados y drenes transversales empedrados.

Interior/Exterior (*Inside/Outside*) – Referencia a un elemento en la parte interna de un camino, que es generalmente el lado del corte en talud (talud posterior) / Referencia a un elemento en la parte externa de un camino, que es generalmente el lado del talud del relleno.

Peralte hacia adentro (*Inslope*) – La pendiente transversal hacia adentro de la subrasante o superficie de un camino que generalmente se expresa como un porcentaje. La pendiente transversal hacia adentro se usa para facilitar el drenaje del agua de la superficie hacia una cuneta interior. Un camino con taludes interiores tiene su punto más alto en el borde exterior de la calzada y su pendiente es descendente hacia la cuneta al pie del talud del corte, a lo largo del borde interno del camino.

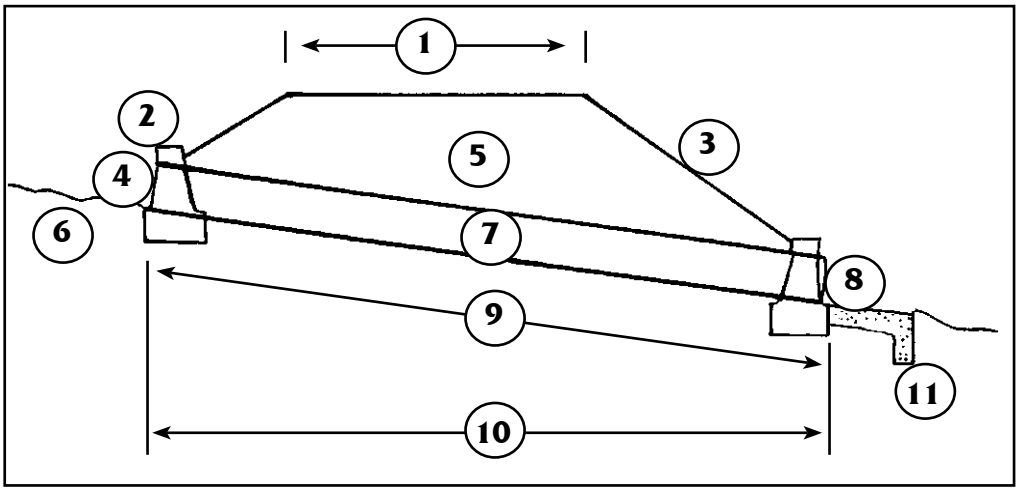
Peralte hacia afuera (*Outslope*) – La pendiente transversal exterior de la subrasante o superficie de un camino, generalmente expresado en porcentaje. La pendiente transversal externa se usa para facilitar el drenaje del agua del camino directamente fuera del borde exterior del camino. Un camino con taludes exteriores tiene su punto más alto en el lado del cerro o en el lado interior del camino y desciende hacia el borde exterior del camino y hacia el talud del terraplén.

Subdrenaje (Dren subterráneo) [*Underdrain* (*Subsurface Drain)*] – Zanja enterrada rellenada con agregado grueso, arena gruesa o grava, que generalmente se coloca en la línea de cunetas a lo largo del camino y cuya función es la de drenar el agua subterránea de una zona húmeda y descargarla en un lugar seguro y estable. Los subdrenes se pueden construir con un tamaño uniforme de roca, pueden envolverse en un geotextil y pueden tener un tubo perforado de drenaje en el fondo de la zanja.

Vado ondulante superficial (Vado, Vado de Base Ancha, Baden) [*Rolling Dip (Dip, Broad- Based Dip)*] – Estructura para drenaje superficial, con un quiebre integrado a la pendiente del camino, diseñado específicamente para drenar el agua desde una cuneta interior o a través de la superficie del camino, mientras que la velocidad de desplazamiento de los vehículos se reduce en cierta forma (véase la foto inferior de la portada de esta guía).

IV. Alcantarillas y Cruces de Drenaje

Figura IV.1 Componentes de una Alcantarilla



1. Ancho del Camino
2. Muro de cabeza con o sin aleros
3. Talud del Terraplén
4. Entrada (Bocatoma)
5. Relleno compactado
6. Terreno natural
7. Alcantarilla
8. Salida
9. Longitud total de tubería
10. Distancia entre muros de cabeza o de remate
11. Gabacha y Dentellón

Alcantarilla (*Culvert*)- Tubería de drenaje hecha generalmente de metal, concreto o plástico, e instalada por debajo de la superficie del camino, para desalojar el agua desde el interior del camino hasta el exterior del mismo, o por debajo del camino. Las alcantarillas se usan para drenar las cunetas, los manantiales y los arroyos que cruzan el camino. La cubeta es el piso o el fondo de la estructura en su punto de entrada.

Alcantarilla tipo "Humboldt (Alcantarilla de Troncos) [*Humboldt Culvert, Log Crossing*] – Una estructura de drenaje hecha de troncos puestos de forma paralela en un canal de flujo y cubierto con suelo para formar la superficie de la vía. Puede haber una o varias capas de troncos superpuestos, paralelos al flujo, o pueden ser hechos de varias capas cruzándose entre ellas para formar una pila de troncos más fuerte. Los cruces de troncos son altamente susceptibles a la obstrucción y con arrastre durante corrientes

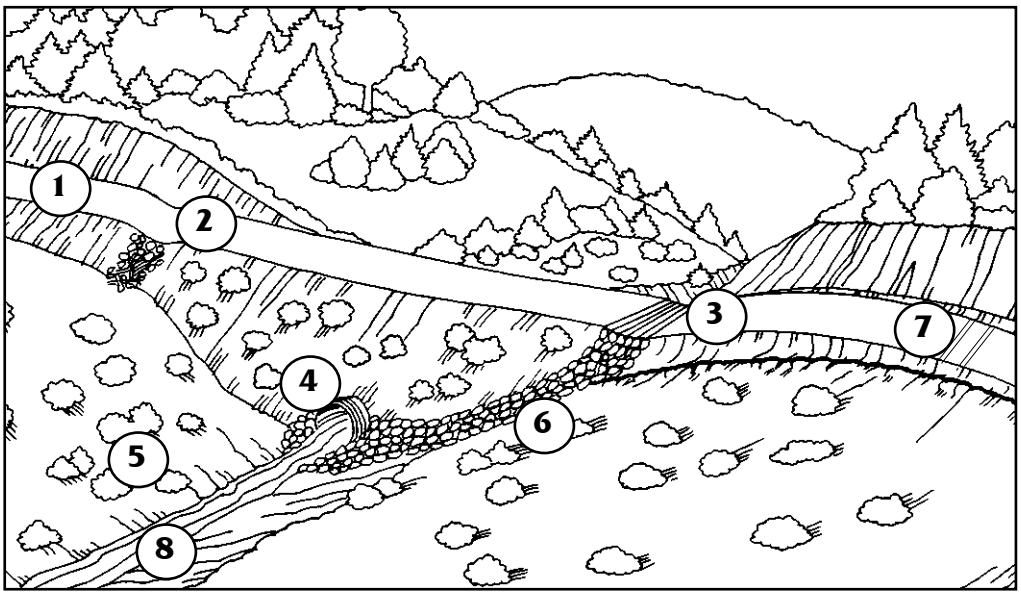
tormentosas dado que éstos tienen pequeños vacíos y una capacidad de flujo relativamente baja. Los cruces de troncos son usados solo para cruces de corriente temporales que deben ser removidas antes de los periodos de invierno.

Ancho total de la margen (Ancho en el nivel de aguas máximo ordinario) [*Bank Full Width (Ordinary High Water Width)*] – Ancho de la superficie del arroyo medido en la época de caudal máximo. Este flujo, en promedio, tiene un periodo de recurrencia del orden de 1,5 años. La etapa de caudal máximo es el flujo dominante de formación del canal y se identifica generalmente como el límite superior normal de la socavación del canal del arroyo por debajo del cual no puede crecer vegetación perenne.

Arrastre de fondo (*Bedload***) –** Sedimentos u otro tipo de materiales que se deslizan, giran o rebotan a lo largo del lecho del cauce o fondo del canal debido al flujo del agua.

Arroyo perenne (*Perennial Stream***) –** Arroyo que normalmente tiene agua corriente durante todo el año.

Figura IV.2 Cruce Natural de Drenaje con una Alcantarilla



1. Camino
2. Vado Ondulante Superficial o Dren Transversal
3. Vado revestido para derrames
4. Alcantarilla
5. Vegetación para control de la erosión
6. Canal revestido con roca
7. Caballones desviadores
8. Arroyo o canal natural de drenaje

Boca de caída (*Drop Inlet***) –** Cuenca de mampostería o de concreto, o pozo vertical a la entrada de una alcantarilla metálica, usualmente del mismo diámetro que el de la alcantarilla, y con frecuencia ranurado, para permitir que el agua fluya hacia la alcantarilla a medida que el nivel del agua asciende alrededor de la parte exterior. Con frecuencia se colocan las bocas de caída en alcantarillas de alivio de cunetas en donde los sedimentos o escombros podrían obturar la tubería. Una boca de caída también ayuda a controlar la elevación de la cuneta.

Bocatoma (Entrada) [*Inlet***] –** La abertura en una estructura de drenaje o de una tubería donde el agua ingresa por primera vez a la estructura.

Borde libre (*Freeboard***) –** La altura adicional de una estructura por arriba del nivel de aguas máximo de diseño para evitar derrames y desbordamientos. Además, el borde libre, en cualquier momento, es la distancia vertical entre el nivel del agua y la parte inferior de la losa, las vigas o la estructura de un puente.

Cuenca de captación (*Catch Basin***) –**Cuenca excavada o construida a la entrada del tubo de drenaje transversal de la alcantarilla, la cual se usa para almacenar agua y para dirigirla hacia el tubo de la alcantarilla.

Espolón de arroyo (espigón) [*(Stream Barb (Jetty)***) –** Usualmente son dentellones de roca de baja altura que sobresalen de las márgenes de un arroyo extendiéndose hasta el canal del arroyo para reencauzar el flujo y alejarlo de una margen propensa a la erosión.

Llanura de inundación (*Flood Plain***) –** Zona nivelada o con ligera pendiente a cualquiera de los lados del canal activo (principal) que se encuentra sumergido a veces durante niveles altos de agua o durante periodos de inundación. El limo y la arena se depositan y se acumulan en esta zona a lo largo del canal principal.

Muro de cabeza o de remate (*Headwall***) –** Muro construido de concreto, gaviones, mampostería, troncos o madera, alrededor de la entrada o de la salida de una tubería o estructura de drenaje para aumentar la capacidad de flujo de entrada, reducir el riesgo de daños por escombros, retener el material de relleno y minimizar la socavación alrededor de la estructura.

Muros alero (*Wing Walls***) –** Estructuras de mampostería o de concreto construidas a los lados de los muros de cabeza a la entrada y a la salida una alcantarilla y que han sido diseñadas para retener el relleno de la calzada y para conducir el agua hacia la estructura de drenaje y fuera de ésta mientras que al mismo tiempo se protege el camino y el relleno contra la erosión.

Nivel de aguas máximas (*High Water Mark***) –** La línea sobre una margen o en la orilla establecida por el nivel máximo de agua. Generalmente se identifica por evidencias físicas tal como una impresión natural (berma pequeña) sobre la margen, por cambios en el tipo de suelo, por destrucción de la mayor parte de la vegetación, o por la presencia de basura y de escombros.

Protección de salida (*Outlet Protection***) –** Dispositivos o materiales, tales como un muro de cabeza o el enrocamiento de protección, colocado a la salida de las tuberías o de las estructuras de drenaje para disipar la energía del agua que fluye, reducir su velocidad de flujo, y prevenir la socavación del canal o de las márgenes.

Puente Movil (PuenteTemporal) [*Portable, Temporary Bridge***] –** Son puentes cruzando estructuras que son típicamente modulares y relativamente cortas. Estos puentes pueden ser colocados en areas de cruce temporales y pueden ser reusados. Marcas específicas de puentes modulares o portátiles incluyen Hamilton EZ, Puente Bailey, ACROW, Puente modular grande R, Rapid-Span Structures, Ltd. y otros puentes manufacturados. Planchas de ferrocarril también se utilizan para este propósito.

Rejilla contra Escombros/Arrastre (*Trash Rack***) –** Barrera construida sobre o justo aguas arriba de la bocatoma de una alcantarilla para atrapar escombros flotantes, troncos, maleza, y sedimentos para prevenir el taponamiento de la alcantarilla. Estas generalmente se hacen de hierro angular, barras riel, tubos, o madera con piezas paralelas entre con una separación de aproximadamente 15 a 30 cm. Estas rejillas requieren de limpieza periódica cuando estan llenas de escombros.

Salida (*Outlet*) – La abertura en una estructura o tubería de drenaje donde el agua abandona la estructura. La salida es generalmente más baja que la entrada para garantizar que el agua fluye a través de la estructura.

Sección terminal metálica (*Metal End Section***) –** Muro artificial de cabeza o de alero, fabricado generalmente con el mismo tipo de metal que el de la alcantarilla, para mejorar la capacidad de entrada del caudal.

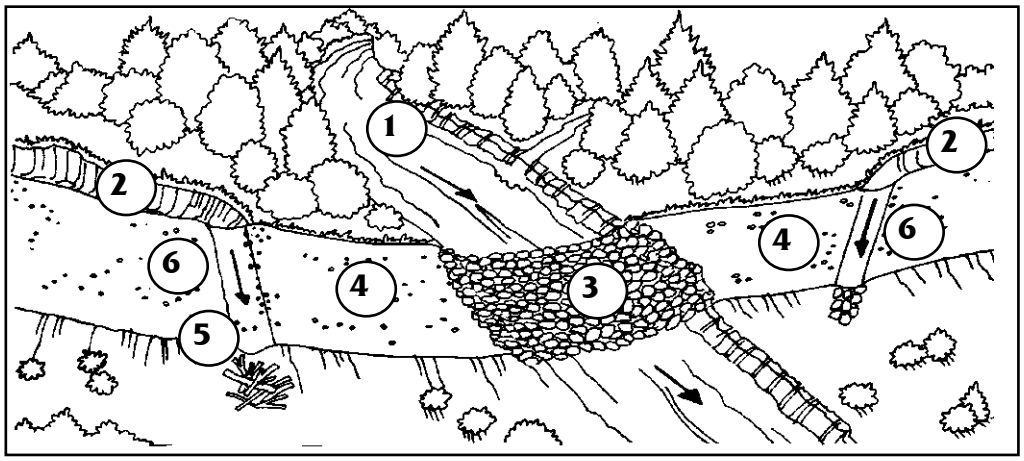
Socavación (*Scour*) – Erosión o arrastre de suelo en el fondo de un arroyo, en las márgenes de un río, en un canal o por detrás de una estructura, causado en general por un aumento en la velocidad del agua o debido a la falta de protección.

Tocón (*Rootwad*) – La bola de raíces de árbol y de tierra que se extrae del suelo al desenterrarse un árbol.

Tubificación (*Piping*) - El arrastre de suelo fino por debajo de una tubería, terraplén o estructura, causado por fuerzas de filtración y por el agua en movimiento, que puede hacer que una estructura sea socavada y llegue a fallar.

V. Vados o Cruces en estiaje

Figura V.1 Vado Simple



1. Arroyo
2. Cuneta
3. Fondo endurecido del arroyo
4. Revestimiento con grava o piedra
5. Desperdicio maderero o rocoso
6. Vado superficial ondulante o dren transversal

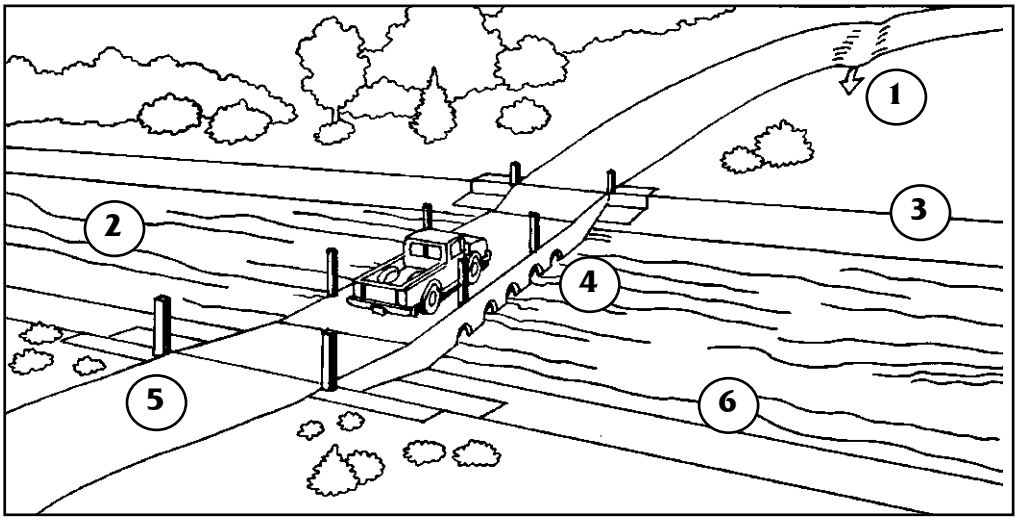
Vado con alcantarillas (*Vented Ford*) – Estructura diseñada para dejar pasar el flujo de agua normal o bajo en el canal de un arroyo o de una corriente de manera segura a través de la estructura (por ejemplo, alcantarillas) que subyace a una superficie de rodadura endurecida o reforzada. Durante periodos de altos niveles del agua o de avenidas, el flujo pasa por encima de la estructura y generalmente impide el paso de vehículos.

Vado Mejorado, Badén (Cruce en estiaje) [*Improved Ford (Low-Water Crossing) (Drift)*] – Estructura de mampostería, concreto, gabiones u otro tipo de estructura con suendurecida construida a través del fondo de un arroyo intermitente o permanente para mejorar el paso de vehículos durante periodos de estiaje y para minimizar la alteración del canal o la producción de sedimentos. Vado o cruces mejorados tienen la misma interpretacion.

Vado Simple, Badén (Cruce en estiaje) [*Simple Ford (Low-Water Crossing) (Drift)*] – Estructura de roca o de otro material endurecido que se construye a través del fondo de un bajío, barranca o lecho de un arroyo que está generalmente seco, para poder mejorar el paso de vehículos durante periodos de estiaje o de sequía.

Vertedero de Cresta Ancha (Cimacio de Cresta Ancha, Cimacio de Herradura) [*Broad Crested Weir*] – Una forma específica de vertedero que es relativamente ámplia comparada con la elevación de la superficie del agua. Generalmente se usan en vados o presas vertedoras como un lugar para medir flujos o modelar su comportamiento. Véase Figura (V.2) en siguiente página.

Figura V.2 Vado Mejorado con Alcantarillas



1. Vado ondulante superficial o dren transversal
2. Arroyo perenne
3. Nivel de aguas máximas
4. Vado mejorado con alcantarillas
5. Camino
6. Nivel de aguas normales

VI. Control de la Erosión

Barrera contra Azolves (Cerca contra limos, Trampa de Sedimentos) (*Silt Fence***) –** Barrera temporal usada para interceptar los escurrimientos cargados de sedimentos que bajan por los taludes. Está hecha generalmente de materiales geotextiles porosos.

Barrera de maleza (*Brush Barrier***) –** Estructura para el control de sedimentos formada por vegetación del tipo maleza o por desperdicio vegetal acopiado al pie de un talud de relleno, siguiendo el contorno de un talud, a lo largo de un camino, o a la salida de alcantarillas, de cunetas de desalojo, de drenes empedrados o de caballetes desviadores para atrapar los sedimentos.

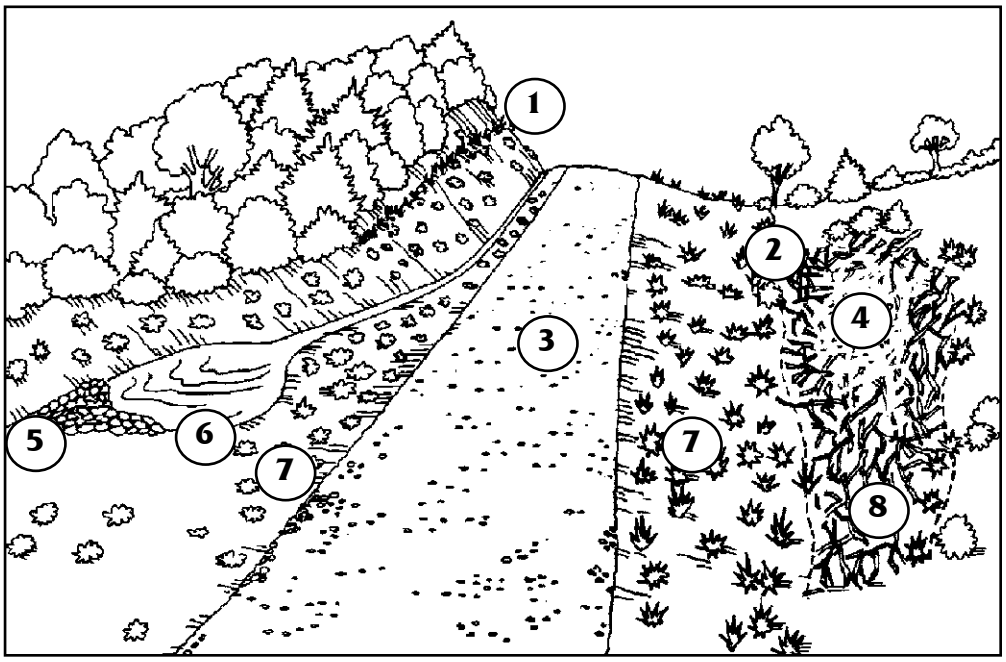
Bultos de Ramas [*Wattles (Live Fascine)*] – Haces largos de maleza o de ramas cortadas amarrados entre sí en forma de estructuras alargadas, las cuales se entierran o se colocan como estacas siguiendo el contorno de un talud, preferiblemente para que retoñen y formen una trampa para sedimentos o para desviar el flujo laminar que baja por el talud.

Camellón (*Windrow***) –** Hileras de desechos de tala de árboles y de vegetación leñosa que se han apilado para atrapar a los sedimentos, así como para que se descomponga por sí sola o para su eventual incineración; la acción de colocar camellones.

Capas de maleza (*Brush Layers***) –** La práctica biotécnica de excavar terrazas de poca altura en la superficie de un talud, colocar en capas cortes de la vegetación que volverán a crecer, y tapar (enterrar) los cortes con suelo. Los recortes se colocan en dirección perpendicular al contorno del talud. Véase Figura (VI.1) en siguiente página.

Control Biotécnico de Erosión (*Biotechnical Erosion Control Methods***) –** Combinación de medidas de vegetación y estructurales empleadas para prevenir la erosión o para estabilizar taludes y márgenes de arroyos. Dentro del término "biotécnico" se describen varios métodos para colocar una cubierta vegetal al sembrar una combinación de plantas vivas, latentes y/o en descomposición en las márgenes y en las orillas de manera que actúen estructuralmente, o en combinación con enrocamiento de protección o con estructuras físicas tales como encofrados o gaviones.

Figura VI.1 Empleo de Vegetación, Materiales Forestales y Roca para Control de la Erosión



1. Setos vivos o arbustos (Control Biotécnico de la Erosión)
2. Barrera contra azolves
3. Camino revestido con agregados (Control Físico de la Erosión)
4. Sítio de Trabajo
5. Enrocamiento de Protección
6. Cuenca de captación de sedimentos
7. Pastos, cubierta vegetal y otro tipo de vegetación (Control Vegetal de la Erosión)
8. Desperdicio de tala de árboles y materiales forestales diseminados en el terreno (Control Físico de la Erosión)

Control de Erosión (*Erosion Control***) –** Es la acción de disminuir o eliminar la erosión en progreso producida por el impacto de las gotas de lluvia, la formación de surcos, la formación de barrancas, el desmoronamiento de los bordos, y otros procesos superficiales.

Cubierta Retenedora de Humedad (Cobertura Vegetal) [*Mulch***]** - Material ubicado o esparcido sobre la superficie del terreno para retener humedad, promover la germinación de semillas, y proteger el suelo de la lluvia y la erosión de arroyos (barranquillas/quebradas).

Cuenca de captación de sedimentos (*Sediment Catchment Basin***) –** Cuenca artificial diseñada para disminuir la velocidad del agua y para atrapar sedimentos a medida que se van depositando en el agua.

Desperdicio maderero (*Slash***) –** Todas las copas de árboles, ramas, corteza y productos forestales de desecho, ramas tiradas por el viento, u otros tipo de escombros dejados en el terreno como resultado del corte de madera o de otros productos forestales.

Erosión (*Erosion***) –** Proceso mediante el cual la superficie del terreno es arrastrada y las partículas de suelo son desplazadas por la acción del viento o del agua en forma de gotas de lluvia, escurrimientos superficiales y oleaje.

Escarificación (*Scarification***) –** Acción de escarificación o de desmonte de la superficie del bosque o de la superficie de un camino y de mezclado de esos materiales con un suelo mineral, generalmente mediante equipo mecánico, para aflojar el suelo, disminuir la compactación y preparar la zona para sembrar pastos o árboles.

Especies nativas (*Native Species***) –** Especies que se encuentran o viven naturalmente en una cierta zona (nativas), como pueden ser las plantas nativas que crecen localmente.

Estacas vivas (*Live Stakes***) –** Secciones de plantas leñosas que se cortan en tramos (estacas) y se colocan o se hincan en el talud. La materia vegetal se coloca durante el otoño o en la primavera cuando la planta

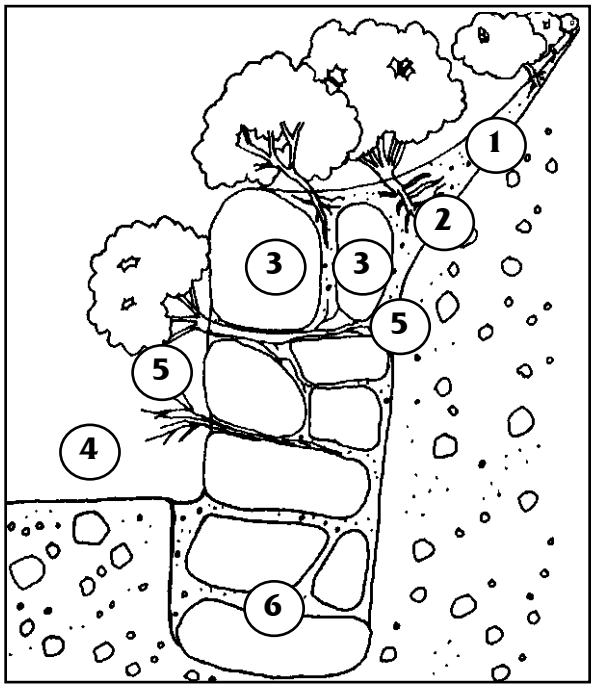
original (y en consecuencia los cortes que se hagan de ella) está latente. El material vegetal usado para estacas es generalmente de las especies resistentes que se enraizarán fácilmente a partir de las estacas y con el tiempo crecerán hasta convertirse en matorrales leñosos que refuerzan la estructura del suelo que recubre al talud.

Estructura de Detención (Dique) [*Check Structure, Dike, Gully Control Structure***] -**Una pequeña presa construida en un arroyo (Barranquilla) o canal para minimizar la velocidad del flujo, detener sedimentos, minimizar la erosión de canales, y promover la vegetación del área. Las estructuras son hechas normalmente de fardos, roca, barandillas, troncos, costales de agregado, concreto o mampostería.

Medidas de control de erosión usando Vegetación (*Vegetative Erosion Control Measures***) –** Uso de cortes o estacas vivas, semillas, césped y trasplantes para generar vegetación (pasto, maleza, árboles) para el control de la erosión y para trabajos de protección de taludes.

Medidas Físicas de control de la erosión (*Physical Erosion Control Measures***) –** Medidas que no son de origen vegetal usadas para controlar la erosión, tales como el blindaje del suelo con enrocamiento de protección, barreras contra azolves, esteras tejidas, gaviones, extendido o colocación de hileras de desperdicio vegetal de explotaciones forestales o de materiales leñosos, etc., así como para controlar el agua mediante estanques de sedimentación, cunetas de drenaje revestidas, etcétera.

Figura VI.2 Medidas Biotécnicas de Control de Erosión - Muros con Estacas Vivas



1. Relleno
2. Retoños con raíces
3. Muro de roca
4. Camino
5. Estacas vivas
6. Cimentación

Pasto Vetiver (*Vetiver Grass***) –** Una de las muchas variedades de pasto no agresivo de grandes atados que se usa ampliamente para control de erosión y conservación de humedad. Cuando se siembra en hileras hace más lento el escurrimiento y sirve de filtro para los sedimentos. Su sistema de raíces en forma de cortina ayuda a anclar al suelo y compite mínimamente con raíces de cultivos vecinos.

Prevención de la erosión (*Erosion Prevention***) –** Se trata de evitar la erosión antes de que ésta ocurra. La prevención de la erosión es generalmente menos costosa y más efectiva que el control de la erosión. El

objetivo de la prevención de la erosión es la protección de un camino, incluidas sus estructuras de drenaje, los taludes de corte y terraplén y las zonas afectadas, así como la protección de la calidad del agua.

Quebrada (Cárcava, Barranquilla) [*Gully***] -** Un canal de erosión formado por el escurrimiento superficial concentrado que es generalmente mayor que un metro cuadrado en área de sección transversal (1 m de profundidad por 1 m de ancho). Las quebradillas generalmente se forman en donde la superficie del camino o dique de escurrimiento se desvía hacia pendientes erosivas, sin protección, o rellenos sueltos.

Sedimentación (Sedimento) [*Sedimentation (Sediment)***] –** Suelo, generalmente arcilla, limo y arena, que es erosionado del terreno o de caminos pobremente construidos y llega a un arroyo o a una corriente de agua, disminuyendo por lo general la calidad del agua en los ríos, arroyos y lagos.

Setos vivos de árboles (*Vegetative Contour Hedgerow***) –** Hileras de árboles y de arbustos que generalmente se plantan en los contornos a través de los taludes que conforman una frontera y que pueden proporcionar control de protección contra la erosión inducida por flujo laminar, y al mismo tiempo producir alimento y refugio para la vida silvestre.

Suelos erosionables (*Erosive Soils***) –** Suelos que son relativamente susceptibles a la erosión y al movimiento ocasionado por el impacto de las gotas de lluvia al caer y por los escurrimientos superficiales. Es de todos conocido que los suelos finos granulares sin cohesión tales como arenas finas derivadas de la descomposición del granito, limos o arenas finas, son conocidos por ser muy propensos a la erosión.

VII. Términos Varios

Ángulo de reposo (*Angle of Repose***) –** El talud o ángulo máximo al cual un material granular, tal como roca suelta o suelo permanece estable.

Área amortiguadora, Zona de Amortiguación (*Buffer Zone***) –** Zona designada a lo largo de un arroyo o alrededor de un cuerpo de agua o de una zona con ancho suficiente como para minimizar la entrada de substancias químicas forestales, sedimentos u otro tipo de contaminantes en el cuerpo de agua o para proteger la zona.

Camino de arrastre (Arrastre) [*Skid Trail (Skidding)***] –** Sendero temporal no estructural sobre el piso del bosque que se usa para arrastrar los árboles talados o los troncos hasta un embarcadero de troncos.

Cancelación del camino (*Road Obliteration***) –** Una forma de cerrar el camino en la que se rellenan de nuevo las zonas excavadas, se retiran los rellenos y las estructuras de drenaje, se restauran los contornos a su condición natural, se reforesta el área, y a final de cuentas se intenta restaurar la configuración y la condición natural del terreno. De esta manera se eliminan los impactos ambientales más desfavorables producidos por el camino.

Cierre del camino (Temporal) [*Road Closure (Temporary)***] –** Cierre del acceso vehicular a un camino mediante el uso de barricadas tales como puertas, barreras de troncos, montones de tierra, u otro tipo de estructuras provisionales. El resultado final es la restricción en el uso del camino durante un cierto tiempo.

Curvas de nivel (*Contours***) –** Líneas dibujadas en un plano que conecta puntos con la misma elevación. Las curvas de nivel representan números pares y el intervalo de elevaciones debe seleccionarse de manera que sea congruente con el terreno, la escala y el uso previsto para el plano. Las curvas representan niveles.

Explotación forestal (Tala de madera) [*Logging (Harvesting)***] –** La explotación forestal es el proceso de tala de árboles para sacar madera. Éste incluye el derribo, el arrastre, la carga y el transporte de los productos forestales, en particular de troncos.

Gaviones (*Gabions***) –** Jaulas (generalmente de alambre) rellenadas con roca (o de fragmentos de concreto triturado) de entre 10 y 20 cm de tamaño que se usan para la construcción de estructuras de control de la erosión, vertederos, protección de márgenes o estructuras de contención.

Geotextil (Tela de filtro) [*Geotextile (Filter Fabric)***] –** Textil fabricado con fibras sintéticas de "plástico", que generalmente no son biodegradables, para formar un producto semejante a un delantal. Los geotextiles pueden ser tejidos o no tejidos y pueden tener diferentes grados de porosidad, área abierta y propiedades de resistencia. Se usan como barreras contra la humedad, para separación o refuerzo de suelos, para filtración y para drenaje.

Hábitat (*Habitat***) –** El medio ambiente natural que forma el hogar de plantas y animales nativos. Por ejemplo, los márgenes de los ríos constituyen el hábitat para insectos que son la principal fuente de alimentación de muchos peces.

Impacto ambiental (*Environmental Impact***) –** Acción o serie de acciones que tienen un efecto sobre el medio ambiente. Una Evaluación de Impacto Ambiental predece y evalúa estos efectos, tanto positivos como negativos, y las conclusiones se usan como una herramienta para la planificación y para la toma de decisiones.

Mejoramiento (*Upgrading***) –** El proceso mediante el cual se mejora el estándar de un camino existente o se altera para permitir una mayor capacidad y un recorrido más seguro por parte de un mayor volumen de tránsito.

Mejores Prácticas de Gestión (MPG) [(*Best Management Practices (BMP)***] –** Lineamientos prácticos que se pueden aplicar para disminuir el impacto ambiental de los caminos y de las actividades de gestión de bosques (tales como la construcción de caminos, vías de arrastre y desembarcaderos de troncos) y para proteger la calidad del agua. En las prácticas BMP se incluyen los aspectos clave de planificación, ubicación, diseño, construcción y mantenimiento de caminos u otras actividades que pueden ser causa de impactos ambientales adversos, así como métodos sugeridos para prevenir esos impactos.

Mitigación (*Mitigation***) –** La acción o elemento específico usado para disminuir o eliminar un impacto ambiental adverso.

Objetivos de la Gestión de Caminos (*Road Management Objectives***) –** Son los objetivos que establecen la finalidad de un camino en particular con base en lineamientos directivos y en los objetivos de administración de acceso. Entre los objetivos de administración de caminos se incluyen los criterios de diseño, los criterios de operación y los criterios de mantenimiento.

Plataforma de carga (Plataforma de troncos) [*Landing (Log Deck)*] – Cualquier lugar en el sitio de la explotación o junto a éste, donde se apilan los troncos después de ser encerrados, en espera de su manejo subsecuente, carga y transporte. Ésta es un área relativamente plana, comúnmente con un diámetro entre 20 y 50 metros.

Poner fuera de servicio un camino (*Road Decommissioning*) – Cierre permanente de un camino mediante técnicas que incluyen el bloqueo de la entrada, la colocación de ramas y de matorrales sobre la carpeta de rodadura, el crecimiento de vegetación, ubicación de caballones desviadores, eliminación de rellenos y las alcantarillas, o reestablecimiento de los patrones naturales de drenaje. Sin embargo, la configuración

básica del camino, o la plantilla sigue estando en el lugar. El resultado final es dar por terminada la función del camino y mitigar los impactos adversos ambientales producidos por el mismo.

Rehabilitación (Recuperación, Restauración) [*Reclamation (Rehabilitation)*] – Actividades en las que se recicla, repara o mejora una parte o todo un camino existente, banco de préstamo o zona alterada y se restaura a su condición original o a alguna condición final deseada.

Suelo nativo (*Native Soil*) – Suelo natural, en el lugar o *in situ* que se ha formado en el sitio y que no ha sido importado artificialmente al sitio.

Zonas Protectoras de Aguas (ZPA) [*Streamside Management Zone (SMZ)*] – El terreno, junto con la vegetación que ha crecido dentro de él, inmediatamente en contacto con el arroyo y suficientemente cercana a éste como para tener una influencia importante sobre el carácter ecológico total y sobre la función del arroyo. Constituye una zona de amortiguamiento a lo largo de un arroyo en la cual las actividades están limitadas o prohibidas.

Capítulo 1

Introducción

"Las ideas valen unos cuantos centavos la docena. La gente que las pone en práctica, no tienen precio."

-A. Einstein

Los caminos rurales de bajo volumen de tránsito, como los de acceso del agricultor al mercado, los que enlazan a las comunidades y los usados para explotaciones mineras y forestales son partes necesarias de cualquier sistema de transportación que le dé servicio al público en zonas rurales, para mejorar el flujo de bienes y servicios, para ayudar a promover el desarrollo, la salud pública y la educación, y como una ayuda en la gestión del uso del suelo y de los recursos naturales (Foto 1.1). Al mismo tiempo, los caminos y las zonas afectadas pueden producir cantidades importantes de sedimentos (Foto 1.2) y pueden constituir uno de los más grandes impactos negativos sobre el medio ambiente local, la calidad del agua y la vida acuática. Los caminos pueden inducir una erosión significativa, crear barrancas, causar efectos en el agua subterránea, la fauna silvestre y la vegetación, afectar la estructura social, degradar los valores escénicos, desperdiciar fondos limitados, y hacer improductivas las tierras útiles (Foto 1.3).

El objetivo fundamental de esta guía es poder ayudar a ingenieros, planificadores, especialistas ambientales y administradores de caminos a tomar buenas decisiones, proteger el ambiente, y construir buenos caminos de bajo volumen. Los aspectos claves que deberían tomarse en cuenta durante la planificación de un proyecto de camino son los cambios o los impactos negativos que pueden inducirse en una cierta región por la presencia del camino, los cuales pueden resultar importantes a la vez que irreversibles o que pueden ser difíciles de mitigar. Por lo tanto, habrá necesidad de analizar la rentabilidad a largo plazo de un proyecto de camino, en lo que se refiere a costos en los aspectos sociales, ambientales y fiscales. El

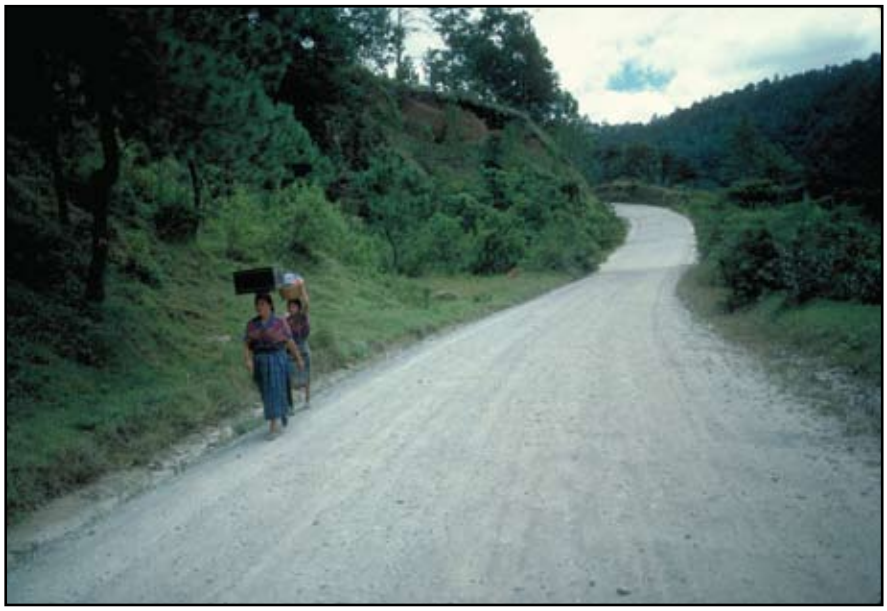


Foto 1.1 Un camino con impacto mínimo que está bien drenado, tiene una superficie estable de rodadura, terraplenes estables , y es satisfactorio para el usuario.

Foto 1.2 Camino con drenaje inadecuado que tiene una superficie de rodadura rugosa para los usuarios, es una fuente de contaminación para sedimentos, y resulta relativamente costosa para darle mantenimiento.

análisis ambiental constituye una herramienta principal para examinar todos los aspectos de un proyecto, maximizar su utilidad y minimizar los problemas. Se deberá hacer énfasis en un Equipo de Trabajo Interdisciplinario. No todos los impactos adversos de los caminos se pueden evitar, aunque muchos de ellos sí se pueden prevenir, por lo que luego se podrán sopesar y evaluar los impactos negativos y positivos de un proyecto de camino.

Los caminos son necesarios, pero deben construirse y conservarse de tal manera que se puedan controlar o evitar los impactos ambientales negativos. Un camino bien planeado, ubicado, diseñado y construido producirá impactos adversos mínimos en el medio ambiente y será rentable en cuanto a costos a largo plazo, con costos razonables de mantenimiento y reparación. El control de la erosión y la protección de la calidad del agua son esenciales para la calidad de vida, la salud del bosque y de los ecosistemas de la región arbolada, y de la sustentabilidad a largo plazo de los recursos rurales. Las áreas verdes tales como las zonas arboladas y los bosques juegan un papel vital en la producción, purificación y mantenimiento del agua limpia. Los caminos deben proteger la calidad del agua y el medio ambiente biótico que depende de la misma.

Las **Mejores Prácticas de Gestión** (MPG o BMP por sus siglas en inglés) corresponden a aquellos principios y prácticas de ingeniería y diseño que permiten proteger la calidad del agua, así como la función del camino cuando se aplican adecuadamente. Las Mejores Prácticas de Gestión que aquí se presentan constituyen una recopilación de ideas y de técnicas que se pueden aplicar a la gestión de caminos, con el fin de reducir o de eliminar muchos de los impactos potenciales derivados de la operación de caminos y proteger la calidad del agua. También representan buenas prácticas de diseño y construcción de caminos, que son rentables en términos generales a largo plazo al prevenir

Foto 1.3 Camino problemático debido a fallas en los cortes del camino. Los problemas de inestabilidad ocasionan retrasos en los usuarios del camino y altos costos de mantenimiento o de reparación.

Mejores Prácticas de Gestión

Los objetivos clave de las Mejores Prácticas de Gestión son poder lograr lo siguiente:

- Producir un diseño del camino seguro, rentable, amigable con el ambiente y práctico que cuenta con el apoyo de los usuarios y que satisface las necesidades de éstos.
- Proteger la calidad del agua y reducir la acumulación de sedimentos en los cursos de agua.
- Evitar los conflictos con el uso del suelo.
- Proteger las zonas sensibles y reducir los impactos en los ecosistemas.
- Mantener canales naturales y el flujo de arroyos naturales, y mantener el paso de organismos acuáticos.
- Minimizar los impactos al terreno y al canal de drenaje.
- Controlar el agua superficial sobre el camino y estabilizar la superficie de rodadura y la base del camino (Foto 1.4).
- Controlar la erosión y proteger las áreas expuestas de suelo.
- Implementar las medidas necesarias de estabilización de taludes y reducir el desperdicio de materiales.
- Evitar las zonas problemáticas.
- Impermeabilizar y alargar la vida útil del camino.

fallas, eliminar las necesidades de reparación y reducir el mantenimiento.

El propósito de este manual es presentar prácticas recomendadas para caminos rurales. Generalmente se define a un camino rural como un camino que tiene un tránsito diario promedio (ADT, por sus siglas en inglés y TPDA en español) de menos de 400 vehículos por día y es usual que las velocidades de diseño sean de menos de 80 kph (50 mph). Esta información es válida para caminos rurales, y la mayor parte de la información se aplica a todos los tipos de caminos, aunque las carreteras de altas especificaciones no son el motivo de este manual. Los aspectos relacionados con la calidad del suelo y del agua que se refieren a temperatura, nutrientes, contaminación química, escombros, caudal, y otros, se encuentran mas allá del alcance de este manual aunque existe una variedad de beneficios derivados de la aplicación de estas prácticas.

Cada uno de los tópicos de este manual contiene el enunciado de un problema que presenta las inquietudes, ventajas e impactos potenciales de cada aspecto en particular. Se presentan las **PRÁCTICAS RECOMENDADAS** y la información acerca de la manera más adecuada o más deseable de planear, localizar, diseñar, construir y conservar los caminos, junto con figuras y tablas. Por último, se enumeran las **PRÁCTICAS QUE DEBEN EVITARSE** para desalentar las

prácticas pobres e indeseables.

En este manual se presentan las Mejores Prácticas de Gestión asociadas a los muchos aspectos de la gestión de caminos. La información presentada en este manual debería convertirse en una parte integral de la planificación del transporte y del diseño de caminos rurales. Un aspecto clave para su aplicación es la necesidad de **contratar y de retener a buenos ingenieros bien capacitados y experimentados** en los organismos operadores a fin de evaluar problemas, tomar en cuenta las condiciones locales y los recursos, e implantar o adoptar esas prácticas, según sea el caso.

"Las ideas valen unos cuantos centavos la docena. La gente que las pone en práctica, no tiene precio."

Es obvio que existen algunas diferencias significativas en las necesidades de caminos y en los detalles de diseño de los mismos en diferentes regiones geográficas. En ocasiones resulta necesario emplear soluciones únicas. Las regiones montañosas se caracterizan en general por tener taludes de fuerte pendiente y condiciones climáticas correspondientes a regiones frías; los desiertos tienen poca humedad para poder aplicar medidas de control de la erosión através de el uso de vegetación pero tienen precipitaciones pluviales intensas de corta duración; las selvas tienen con frecuencia suelos pobres y problemas de drenaje; las regiones en valles altos tienen terrenos abruptos bisectados y cruces para drenaje difíciles, etc.

Sin embargo, los conceptos básicos de planificación, ubicación, diseño y mantenimiento y la selección de las prácticas BMP se aplican a cualquier área. En cualquiera de los sitios se necesita una buena planificación y una adecuada localización del camino. El drenaje de la calzada debe controlarse y los cruces para el drenaje deben seleccionarse cuidadosamente y diseñarse de manera correcta. Todos los caminos necesitan contar con taludes estables, usar buenos materiales y medidas de control de erosión aplicadas debidamente.

Únicamente algunos detalles de diseño varían en función de regiones geográficas y climáticas específicas. A esto se debe que la experiencia y conocimiento local sean tan importantes en el caso de caminos rurales.

Estas prácticas BMP se aplican a la construcción de caminos en la mayoría de las situaciones de campo. Sin embargo, las prácticas BMP se deberán seleccionar (y se podrán modificar) de acuerdo a las condiciones específicas de cada sitio, con la asesoría de ingenieros, administradores y otros profesionales con experiencia en el ramo y todos ellos deben tomar en cuenta los reglamentos locales o nacionales. Las modificaciones deberán investigarse, diseñarse y documentarse antes de ponerlas en práctica; además, deberán vigilarse y con ellas se deberá obtener una protección igual o mejor de la calidad del agua.

Foto 1.4 Camino bien diseñado de "impacto mínimo" que tiene una especificación adecuada para su uso, así como una superficie de rodadura (empedrado) estabilizada.

Capítulo 2

Análisis Ambiental

¡Involucre a todos los interesados!, ¡Comunicación, comunicación, comunicación!

Análisis Ambiental (AA) es un proceso sistemático e interdisciplinario usado para identificar el objetivo de una acción propuesta, para desarrollar alternativas prácticas a la acción propuesta, y para predecir efectos ambientales potenciales derivados de la acción.

Entre los ejemplos de las acciones propuestas se puede mencionar la construcción de caminos, la tala de árboles, el desmonte de árboles para el control de enfermedades, la reforestación, la construcción de una presa hidroeléctrica, o el desarrollo de una cantera. En la Figura 2.1 se ilustran algunas de las diferencias e impactos ambientales de los caminos rurales en comparación con los de altas especificaciones.

Dos de las principales leyes ambientales aplicadas hoy en día son la NEPA (National Environmental Policy Act o Ley Nacional de Políticas Ambientales), establecida en los Estados Unidos en 1964, y los reglamentos USAID 216, los cuales gobiernan el proceso de análisis ambiental de los proyectos patrocinados en todo el mundo por la US Agency for International Development. Muchos otros países y organizaciones tienen

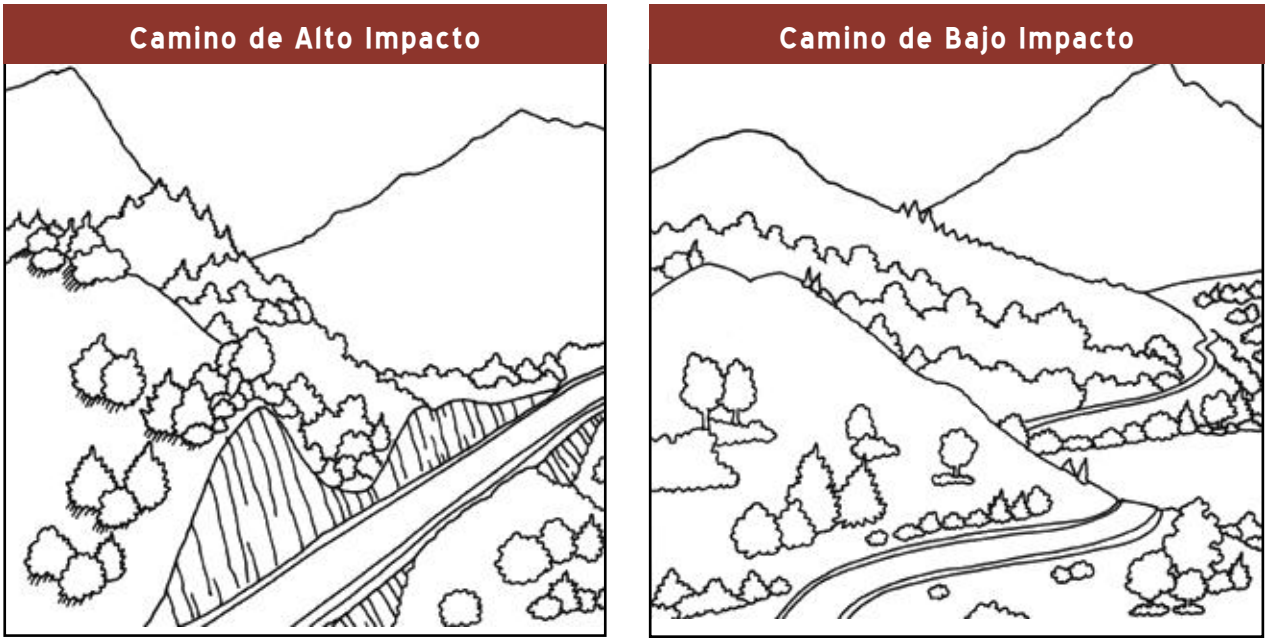


Figura 2.1 Caminos de bajo impacto comparados con los de alto impacto: En estas figuras se muestra el menor trabajo y los menores impactos de los caminos de bajas especificaciones que se adaptan a la topografía. Con un camino de bajas especificaciones se reduce el volumen de cortes y de rellenos, disminuyen los movimientos de tierra y los impactos visuales, y se minimizan los cambios a los patrones de drenaje natural.

leyes ambientales, reglamentos y procedimientos basados en estos documentos fundamentales.

Con un Análisis Ambiental se identifican problemas, conflictos o limitaciones de recursos que pueden afectar al ambiente natural o a la viabilidad de un proyecto. También se examina la forma en que una acción propuesta podría afectar a la gente, a sus comunidades y a su medio de sustento (Foto 2.1). El análisis debe ser realizado por un Grupo Interdisciplinario de Trabajo, constituido por personal con diferentes habilidades y disciplinas relevantes para el proyecto. Entre los miembros del equipo se incluye un Jefe de Grupo y puede estar integrado por ingenieros, geólogos, biólogos, arqueólogos, economistas, trabajadores sociales, etc. El proceso de AA y sus resultados se comunican a las distintas personas interesadas y a los grupos afectados. Al mismo tiempo, el público interesado puede ayudar a proporcionar datos de entrada y comentarios acerca del proyecto propuesto (Foto 2.2). El documento que se genera como resultado del AA guía al encargado de tomar las decisiones y lo induce hacia una decisión informada, lógica y racional relacionada con la acción propuesta.

El proceso de Análisis Ambiental y los estudios del Grupo Interdisciplinario pueden revelar razones sólidas ambientales, sociales o económicas tendientes a mejorar un proyecto. Después de predecir los aspectos potenciales, con el AA se identifican medidas para minimizar problemas y se esbozan las maneras de mejorar la factibilidad del proyecto. En las Figuras 2.2 a, b y c se muestran ejemplos de acciones de mitigación ambientales disponibles para un diseñador a fin de evitar impactos potenciales en la vida silvestre, como pueden ser los pasos a desnivel para animales y los requisitos de las alcantarillas para el paso de peces (Foto 2.3).

Foto 2.1 Un camino bien construido que contribuye al servicio de la población local en una zona rural.

El proceso de Análisis Ambiental puede proporcionar muchos beneficios al constructor de caminos, a los organismos locales y a las comunidades que pudieran resultar afectadas por la construcción del camino y por las actividades de mantenimiento. El proceso y los informes resultantes son herramientas que los gerentes de caminos pueden usar

Foto 2.2 Un aspecto clave del proceso de Análisis Ambiental es la comunicación con los usuarios y entre los miembros del Equipo Interdisciplinario.

Prácticas Recomendadas

- Usar el proceso de Análisis Ambiental desde el principio de la planificación y desarrollo del proyecto.

- Exponer la información acerca del proyecto al escrutinio público.

- Hacer participar a todas las partes afectadas por el proyecto, así como a miembros claves del Grupo Interdisciplinario.

- Incorporar pasos de fauna y para pez en nuestros proyectos.

- ¡¡¡**Comunicación, comunicación, comunicación**!!! La comunicación entre todas las partes interesadas es la clave para el buen entendimiento de los problemas y poder encontrarles solución.

Prácticas Que Deben Evitarse

- Esperar hasta que la planificación del proyecto esté completamente terminada o a que se presenten problemas, antes de realizar el Análisis Ambiental.

- Perderse en el proceso de los estudios de Análisis Ambiental.

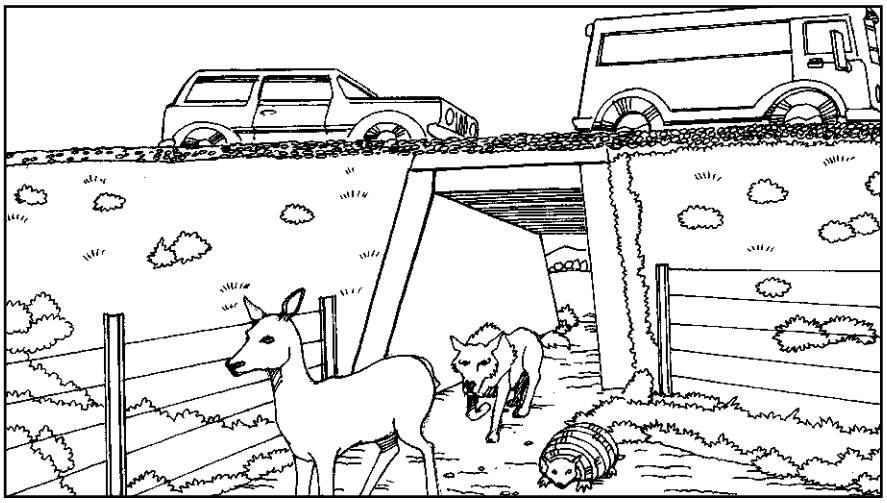


Figura 2.2a Ejemplo de un paso inferior para animales usado en la construcción de caminos, para minimizar el impacto en la migración de la fauna silvestre. Los pasos inferiores permiten a los animales cruzar con seguridad y minimizar los atropellamientos en el camino.

Figura 2.2b Alcantarillas mal diseñadas o instaladas, con "barreras para peces" que evitan el paso de peces. (Redibujado de Evans and Johnston, 1980.)

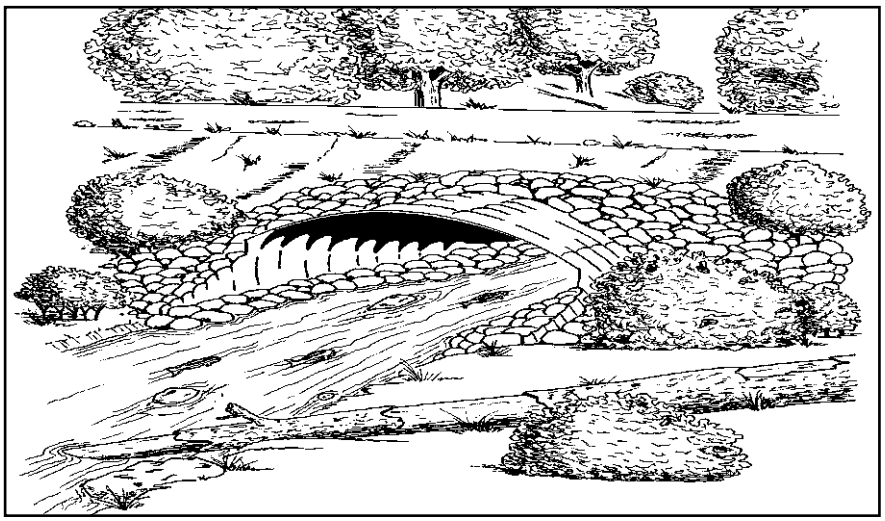


Figura 2.2c Una alcantarilla "amistosa" para los peces (tubo en arco) con el cauce natural del arroyo como fondo para promover el paso de peces y que es lo suficientemente amplia para facilitar flujo normal.

Tabla 2.1

Proceso de OCHO Etapas del Análisis Ambiental y sus Resultados Asociados		
1	Identificación del proyecto	Identifique el objetivo y la necesidad de la acción propuesta. Desarrolle una meta para proporcionar un marco de referencia para el Análisis Ambiental.
2	Establezca el objetivo	Identifique los conceptos, oportunidades y efectos de la implantación de la acción propuesta.
3	Recopilación e interpretación de los datos	Recopile datos. Identique los efectos probables derivados de la implantación del proyecto.
4	Diseño de alternativas	Tome en cuenta un rango razonable de alternativas. Generalmente se consideran cuando menos tres alternativas. Incluya la alternativa de Ninguna Acción. Tome en cuenta la mitigación de los impactos negativos
5	Evaluación de efectos	Pronostique y describa los efectos físicos, biológicos, económicos y de la implantación de cada alternativa. Tome en consideración los tres tipos de efectos: directos, indirectos y acumulados.
6	Comparación de alternativas	Mida los efectos anticipados de cada alternativa con respecto a los criterios de evaluación.
7	Aviso de la decisión y consulta pública	Seleccione la alternativa preferida. Permita la revisión y comentarios por parte de los afectados y del público interesado.
8	Implementación, seguimiento y monitoréo.	Registre los resultados. Implemente la alternativa seleccionada. Desarrolle un plan de seguimiento. Asegúrese de que las medidas de mitigación del AA se están siguiendo.

Foto 2.3 Alcantarilla en arco sin fondo que cubre la mayor parte del claro del cauce del arroyo, mantiene inalterado el fondo natural del arroyo, minimiza los impactos al sitio y ayuda a promover la migración de peces. (Foto proporcionada por S. Wilson-Musser).

como guía para sus decisiones, para generar mejores diseños de caminos y de planes de mantenimiento, para identificar y prevenir problemas, y para ganarse el apoyo del público para el desarrollo de sus actividades. Un documento de AA puede ser largo y complejo para el caso de grandes proyectos con altos impactos potenciales, o puede contener unas cuantas páginas si se refiere a un simple proyecto de caminos. En la Tabla 2.1 se presenta un proceso constituido por ocho etapas, que resulta útil para llevar a cabo el Análisis Ambiental.

Entre los beneficios clave de un AA aplicado al proyecto de un camino, se pueden incluir los siguientes:

- Reducir en costo y tiempo la implementación de un proyecto;
- Evitar modificaciones costosas durante la construcción;
- Determinar el equilibrio correcto entre la necesidad de caminos y los impactos ambientales (Figura 2.1);
- Aumentar la aceptación del proyecto por parte del usuario;
- Evitar los impactos negativos (Foto 2.4) y la violación de las leyes y reglamentos;
- Mejorar el diseño y comportamiento del proyecto (Foto 2.5);
- Producir un ambiente más saludable al evitar o mitigar los problemas (Figura 2.2, foto 2.6);y
- Minimizar los conflictos relacionados con el uso de los recursos naturales.

Foto 2.4 Impacto ambiental adverso producido por la erosión de la superficie del camino, derivada de pendientes fuertes y de drenes transversales inadecuadas. El mantenimiento de este camino también se vuelve difícil.

Entre los ejemplos de medidas típicas de mitigación de los problemas ambientales asociadas a proyectos de caminos, que han sido desarrolladas como resultado de los análisis ambientales, están las siguientes:

- Estructuras adicionales de drenaje transversal a la superficie del camino para disminuir la concentración de agua y los problemas de erosión subsecuentes;
- Relocalización de un camino para evitar cruzar una pradera o una zona sensible
- Adición de tubos extra de alcantarilla para mantener flujos distribuídos a través de una pradera y así evitar la

Foto 2.5 Camino bien diseñado de "impacto mínimo", que tiene una especificación adecuada para su uso, buen drenaje y taludes estables.

formación de barranquillas producidas por los caudales concentrados;

- Ubicación de la ruta para evitar la fragmentación del hábitat de la fauna silvestre o para no pasar por zonas de especies en peligro;
- Adición de cruces para fauna silvestre, tales como pasos superiores e inferiores (Foto 2.7), o establecimiento de zonas de reducción de la velocidad en rutas migratorias de animales para disminuir el número de animales arrollados al cruzar las carreteras;
- Aumentar el diámetro del tubo de alcantarillas, usando alcantarillas de arco sin fondo o construyendo un puente para mantener el fondo del cauce de un arroyo natural, evitar la afectación del canal y los impactos sobre los organismos acuáticos, y promover el paso de peces;
- Colocar o adicionar agregado o algún otro tipo de pavimento a la superficie de rodamiento del camino, para reducir la erosión, la pérdida de materiales y los problemas de polvo, así como para disminuir la frecuencia de mantenimiento y mejorar el confort del conductor;
- Desarrollar una cantera para el proyecto usando materiales locales, pero ubicada en una zona no sensible, y rehabilitar el sítio una vez terminado el proyecto;
- Aplicar medidas específicas de reforestación y de control de erosión para un proyecto, utilizando especies nativas adecuadas de vegetación y un vivero local para el proyecto que proporcione los tipos adecuados de plantas de rápido crecimiento, buena cobertura del suelo y raíces profundas..

Foto 2.6 Localice y opere los caminos para minimizar la degradación de la calidad del agua en los arroyos locales. Minimice la "conectividad" entre los caminos y los arroyos.

Foto 2.7 Una alcantarilla de paso inferior construida para permitir que los animales se desplacen con seguridad entre ambos lados del camino.

Capítulo 3

Aspectos de Planificación y Aplicaciones Especiales

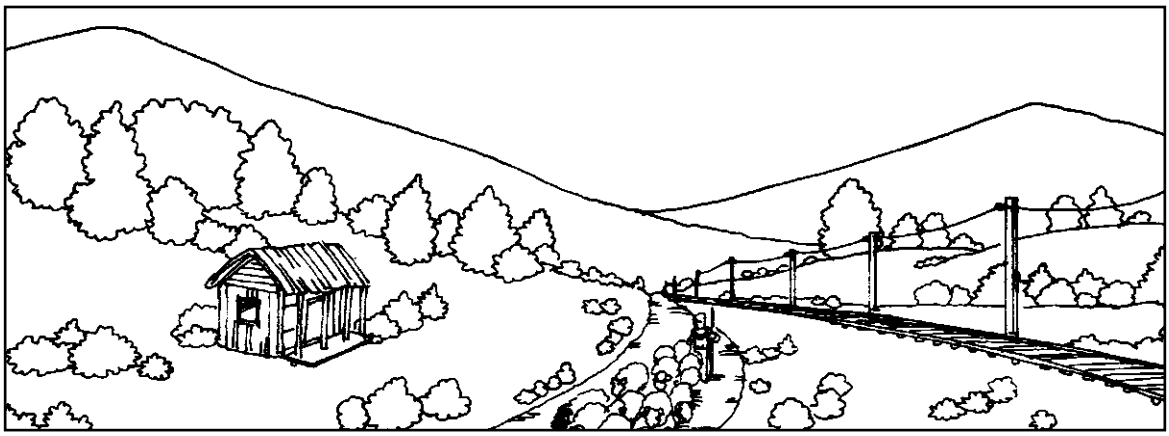
"Evalúe los impactos y beneficios a largo plazo del camino."

Aspectos claves del camino deberán ser tomados en cuenta durante la fase de planificación de un proyecto de caminos, antes de la construcción o antes de mejorar los caminos de acceso hacia una cierta región. Estos aspectos clave incluyen cambios o impactos que un camino puede producir en una zona que puedan considerarse como significativos, irreversibles o difíciles de mitigar. Los beneficios de un proyecto de caminos deben sopesarse con respecto a los costos e impactos a largo plazo de ese proyecto en particular. Una vez que se construye un camino en esa zona, éste puede dar lugar a cambios a largo plazo en el uso del suelo y a un crecimiento no planeado, como se puede observar en la Figura 3.1. Los caminos también pueden constituir una fuente directa de contaminación del agua a través de los sedimentos. En la Figura 3.2 se ilustran algunas de las maneras en que los caminos contaminan directamente con sedimentos a los arroyos cercanos, cuando éstos están a corta distancia y se encuentran "conectados hidrológicamente". Es por ello que se tendrán que analizar los aspectos sociales, ambientales y el costo-efectividad fiscal.

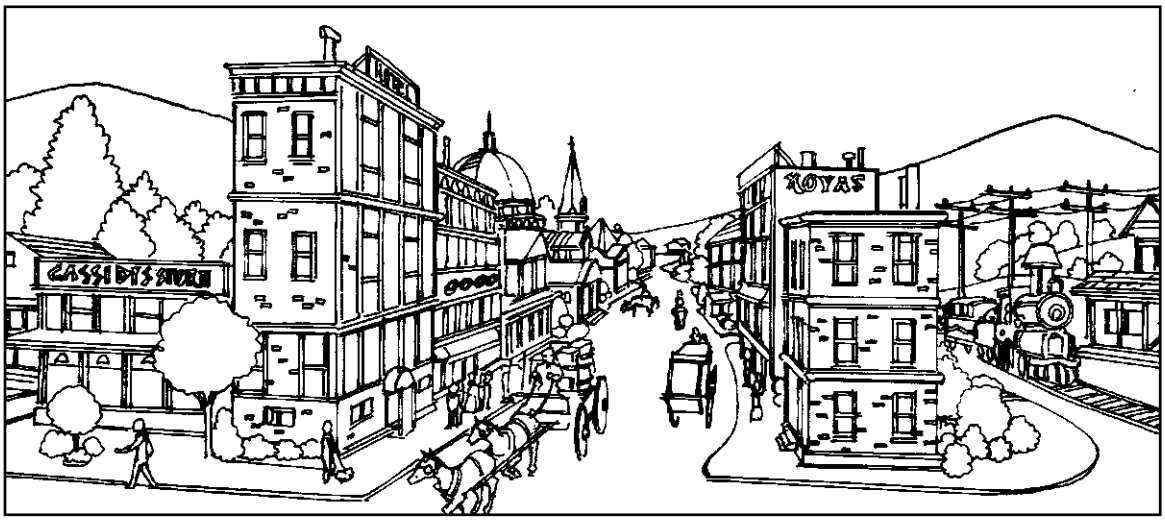
Entre los aspectos claves, se incluyen los siguientes:

- Impactos en el crecimiento de la zona, uso del suelo, deforestación e impactos en comunidades locales o en poblaciones nativas (influencias más allá del derecho de vía del camino) (*Figura 3.1*);
- Localización óptima del camino y del sistema, para satisfacer tanto las necesidades locales, como las necesidades específicas del proyecto;
- Uso potencial a largo plazo del camino en comparación con el uso actual;
- El mínimo de especificaciones de diseño, para dar servicio al usuario del camino y para satisfacer el uso del mismo (*Foto 3.1*);
- Evitar impactos locales en la calidad del agua y su degradación (mantener los caminos alejados de las corrientes de agua y desligados de éstas), así como mejorar o mantener los estándares de calidad del agua (*Figura 3.2*) (*Foto 3.2 y 3.8*);
- Minimizar los impactos en las plantas y animales locales, tanto directa como indirectamente;
- Capacidad para proporcionar mantenimiento suficiente a largo plazo del camino;
- Capacidad de contar con personal técnico bien informado así como con personas capaces y con experiencia local relacionadas con proyectos de caminos. Contratar a personal capacitado. Asegurarse de que ellos cuentan con las herramientas de trabajo necesarias para llevar a cabo el trabajo;
- Identificar y evitar las zonas problemáticas, tales como deslizamientos de tierra, pantanos, suelos pobres o pendientes excesivamente fuertes.

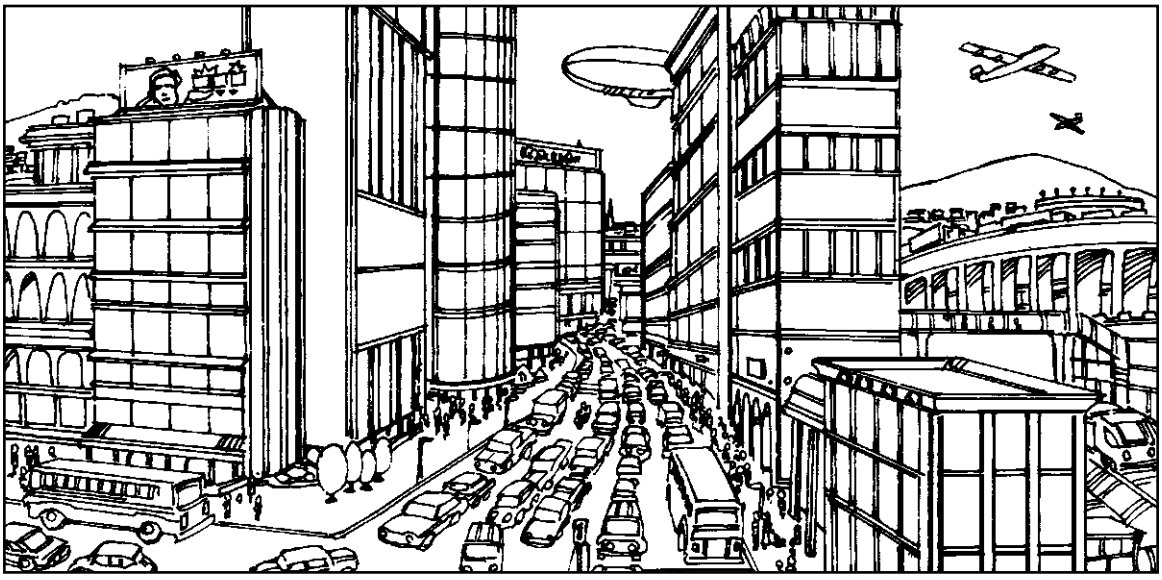
Figura 3.1 Crecimiento planeado y no planeado, a lo largo de un camino. Tómese en cuenta el impacto a largo plazo y las consecuencias del desarrollo de caminos. (Adaptado de Citizens for Responsible Planning).



3.1a Un camino con bajo volumen de tránsito se puede convertir en…



3.1b …Un camino pequeño dentro de un poblado, después de muchos años …



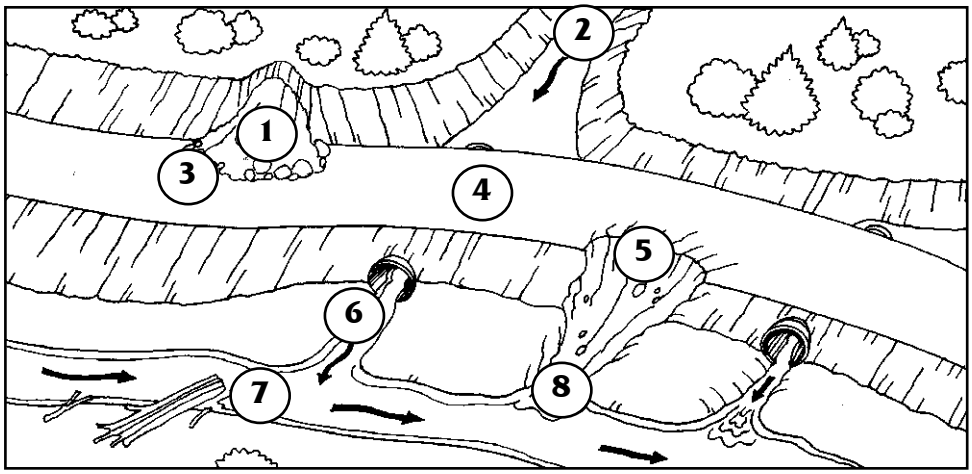
3.1c … y eventualmente llegar a ser una calle muy congestionada en una ciudad.

Foto 3.1 Camino local con bajo volumen de tránsito que produce un mínimo impacto negativo en el medio ambiente y que da servicio a los usuarios locales al proporcionar un enlace entre comunidades.

INDICADORES Y EVALUACIÓN DE CUENCAS PARA CAMINOS PROBLEMÁTICOS

¿Cómo podemos definir cuándo un camino está creando problemas o es probable que los produzca? Los administradores de caminos actuales con frecuencia se enfrentan con expectativas adicionales de la sociedad, en comparación con aquéllas bajo las cuales se construyeron originalmente muchos de los caminos rurales. Las preocupaciones acerca de la calidad del agua, la conexión con caminos y arroyos, las especies en peligro de extinción, la mortalidad de la fauna silvestre y de los impactos en ésta, el uso del suelo, y el buen estado de la cuenca de captación y del ecosistema, son todos ellos factores que influyen en la manera en que se aprecian y administran los caminos. Estas preocupaciones, junto con los problemas económicos y los presupuestos cada vez más reducidos para el mantenimiento de los caminos rurales, están presionando a los administradores de caminos para mejorar la evaluación de las condiciones del camino y los impactos causados por éste. Ellos están efectuando actualmente reevaluaciones acerca de sus niveles de mantenimiento de caminos, necesidades de diseño, opciones de cierre, métodos de protección de caminos contra tormentas, etcétera.

Los indicadores son hechos o condiciones tangibles simples que pueden mostrar avances hacia metas o impactos. Ellos pueden destacar las tendencias, la necesidad de estudios adicionales, las oportunidades de gestión, o las modificaciones necesarias de diseño y construcción. Las metas de la evaluación



1. Falla de un corte del camino
2. Drenaje natural
3. Escombros del deslizamiento de tierra hacia el drenaje
4. Calzada
5. Erosion de la superficie del camino
6. Sedimentos del relleno hacia el arroyo
7. Arroyo
8. Plumas de sedimentos

Figura 3.2 Algunas de las maneras en que los caminos se pueden "conectar" a los arroyos y aportar sedimentos. Mantenga los caminos alejados de los arroyos para proteger la calidad del agua y para reducir el mantenimiento y los daños al camino. (Adaptado de M. Furniss, 1991.)

Foto 3.2 Ubicación inadecuada de un camino, el cual se ha convertido en "riachuelo" y está hidrológicamente "conectado" a los arroyos que lo circundan.

son la búsqueda de indicadores y la determinación de impactos de los caminos sobre el agua, el suelo, la gente y los recursos afines, mediante la revisión de los sistemas de caminos en la cuenca de captación o a escala regional.

Los siguientes aspectos deberían tomarse en cuenta:

- **Posición del talud y riesgo de falla del talud.** ¿Existe la posibilidad de una falla del camino o del talud (con la consecuente descarga de sedimentos en los arroyos y en los recursos sensibles) debido a la localización de un camino sobre el talud de una ladera inestable o saturada, de un cañón o de su ubicación en el fondo de un valle, en la llanura de inundación?.
- **Riesgo de falla del cruce camino-arroyo.**¿Tiene la estructura de cruce del camino la capacidad suficiente para el sitio y la adecuada protección de las márgenes del arroyo?.
- **Proximidad de arroyos y descarga de sedimentos en los cuerpos de agua y en las zonas ribereñas (Foto 3.9).** ¿Está el camino demasiado cerca de un arroyo, y están los sedimentos producidos por el camino siendo descargados en tierras húmedas, lagos o arroyos?.
- **Regímenes de aguas subterráneas y superficiales.** ¿Los caminos interceptan las aguas subterráneas o interfieren con la dirección, variación estacional o cantidad de los caudales de aguas subterráneas o superficiales?.
- **Fauna silvestre, pesquerías y hábitat acuático.** ¿Cuáles son los impactos de los caminos en las poblaciones de peces y de fauna silvestre, en las rutas migratorias, en la fragmentación de los hábitat y particularmente en las especies sensibles y en sus hábitat, a escalas tanto local como regional?.
- **Trastornos causados por el hombre.** ¿Es la red de caminos responsable de la caza ilegal, de basureros, del uso de vehículos todo terreno,

Foto 3.3 Un camino mal ubicado, en la peligrosa llanura de inundación de un río, que ha sido barrido durante una tormenta de impacto tremendo.

de ocupación ilegal y acopio, o de contaminación?.

- **Densidad de caminos.** ¿Es el sistema de caminos demasiado grande, ineficiente, o desperdicia tierras valiosas, con respecto a otros usos mejores de esa tierra?
- **Especies exóticas.** ¿Es la red de caminos responsable de la introducción y diseminación de plantas y animales exóticos no nativos?

Una respuesta afirmativa a cualquiera de las preguntas arriba señaladas indica la necesidad de una evaluación más a fondo de los impactos existentes o potenciales producidos por el camino. Información adicional acerca de las evaluaciones se puede encontrar en referencias tales como la publicación del USDA Forest *Service Roads Analysis*, 1999, o la de Environmental Protection Agency, *National Management Measures to Control Nonpoint Source Pollution*, Draft 2001.

Foto 3.4 Camino que ha sufrido grandes daños durante una tormenta, debido al tamaño insuficiente del tubo de alcantarilla, que se tapó y a la falta de protección contra desbordamiento.

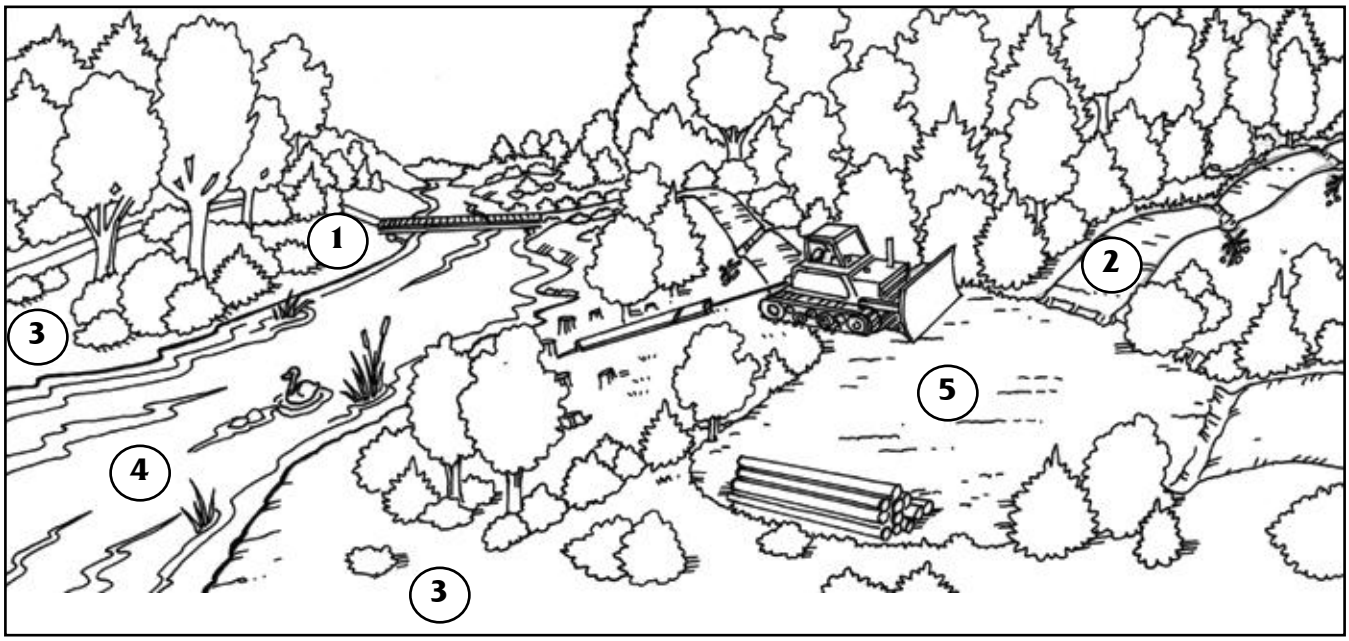
REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE CAMINOS ANTE DESASTRES NATURALES

Los desastres naturales tales como las grandes tormentas o temblores pueden tener un impacto importante en todos los aspectos de la vida y en la infraestructura. Cuando más se necesitan los sistemas de transporte es posible que no estén en operación. Los caminos que resultan dañados o cerrados durante desastres naturales con frecuencia empeoran los efectos del desastre.

Se deberá llevar a cabo una evaluación de la vulnerabilidad de los caminos planeados o existentes, tomando en cuenta los factores arriba mencionados, así como los factores sociales y físicos que afectan la selección o prioridad de un proyecto. Entre los factores sociales está el apoyo de la comunidad local y la necesidad identificada de un proyecto, la capacidad de ejecutar mantenimiento a largo plazo, y la contribución de organismos o de comunidades. Dentro de los factores físicos se incluye eludir zonas problemáticas, la factibilidad de reparaciones o de reconstrucción, el movimiento

Foto 3.5 Se deberá dar mantenimiento a los caminos y a las obras de drenaje para resistir los efectos de grandes tormentas con una erosión mínima, por ejemplo con enrocamientos de protección en las cunetas, las cuales deben mantenerse limpias.

Figura 3.3 Actividades dentro de la Zona Protectora de Agua (ZPA)



1. El puente cruza el arroyo perpendicularmente
2. Construya caminos de arrastre de troncos con pendientes ondulantres y vados (15% de pendiente máxima)
3. ZPA
4. Arroyo
5. Plataforma de carga pequeña

Arrastre los troncos con malacates dentro de la ZPA. Construya plataformas de carga pequeñas, seguras y eficientes. Minimice actividades dentro de la ZPA. Mantenga las plataformas de carga y los caminos de arrastre fuera de la ZPA.

del tránsito y la especificación del camino, así como el costo. Una evaluación resulta muy útil para identificar y minimizar los problemas e idealmente, para reducir el impacto potencial de los fenómenos naturales a los caminos ¡antes de que ocurran!

Muchos factores de planificación y de diseño se pueden usar para reducir la vulnerabilidad de los caminos ante desastres por fenómenos naturales o, en otras palabras, para hacerlos "resistentes a las tormentas" o para limitar el daño a caminos durante desastres o eventos catastróficos. En la publicación de la PIARC World Roads Association, *Natural Disaster Reduction for Roads*, 1999, se proporciona excelente información acerca de este tema. Entre algunas de las consideraciones clave aplicables a caminos de bajo volumen de tránsito se incluyen las siguientes:

- Identificar las zonas de vulnerabilidad histórica o potencial, tales como materiales o áreas geológicamente inestables, zonas propensas a inundación, o zonas de alto riesgo volcánico o sísmico.
- Evitar zonas problemáticas así como la ubicación de caminos en zonas de alto riesgo de peligros naturales, tales como deslizamientos de tierra, zonas de caídas de roca, taludes de fuerte pendiente (de más de 60-70%), áreas húmedas, y suelos saturados.
- Evitar o minimizar la construcción en el fondo de cañones estrechos o en las llanuras de inundación de ríos que resultarán inevitablemente inundadas durante la ocurrencia de eventos de tormentas importantes (Foto 3.3).
- Proporcionar un buen drenaje superficial a la calzada y ondular la pendiente del camino, de tal manera que el agua se disperse del camino frecuentemente y se minimice la concentración de la misma.
- Minimizar los cambios a los patrones naturales de drenaje y de los cruces hacia los

Prácticas Recomendadas

- Planear las plataformas de carga y los caminos de acceso como parte de las actividades previas a la explotación forestal.
- Limitar el número de plataformas de carga y de caminos de acceso construidos.
- Mantener de pequeño tamaño las plataformas de carga de troncos, congruentes con una operación segura y eficiente (Foto 3.7).
- Ubicar las plataformas de carga fuera de la zona ZPA (Figura 3.3).
- Construir las plataformas de carga con suficiente inclinación para que drenen adecuadamente, pero sin que la pendiente exceda de 5 por ciento.
- Ubicar las plataformas de carga de tal manera que se eviten patrones de arrastre de troncos que concentren agua proveniente de los caminos en la misma plataforma o que la descarguen fuera de la plataforma en arroyos locales.
- Dar mantenimiento a las plataformas de carga antes y durante las temporadas de lluvias para evitar problemas de erosión.
- Durante las operaciones y una vez que éstas han concluido, rehabilitar las plataformas de carga y los caminos de acceso con estructuras de desvío del agua y con medidas de control de la erosión.

Prácticas Que Deben Evitarse

- Depositar los escombros de la construcción en lagos y arroyos.
- Usar equipo mecanizado dentro de la ZPA.
- Construcción de caminos y de plataformas de carga de troncos dentro de la ZPA.
- Contaminación de suelos del bosque con combustibles y aceites.
- Tala de árboles que dan sombra al arroyo y refrescan el agua.

Foto 3.6 Seleccione el ancho de la ZPA de conformidad con la pendiente del terreno natural, la cantidad de vegetación y el tipo de suelo. Minimice las actividades y alteraciones dentro de la ZPA.

drenajes. Los cruces de drenaje son costosos y potencialmente problemáticos, por lo que deberán estar bien diseñados. Los cambios a los patrones naturales de drenaje o a los canales, con frecuencia traen como resultados ya sea daños ambientales o fallas.

- Localizar los caminos lejos de taludes siempre que esto resulte práctico y use drenaje transversal con vados ondulantes, en lugar de un sistema de cunetas y de alcantarillas que demandan

Foto 3.7 Ubique los caminos de arrastre de troncos y las plataformas de carga alejados de la ZPA y de las vías fluviales. Mantenga los caminos y las plataformas de carga pequeños y eficientes.

mayor mantenimiento y que se pueden fácilmente obstruir durante eventos de tormentas importantes (Foto 3.4).

- Usar vados simples o con alcantarillas para cruces en estiaje, para cruzar arroyos pequeños o de bajo caudal, en lugar de alcantarillas tubulares que son más susceptibles al taponamiento y a la falla. Mediante vados, proteja todo el perímetro mojado de la estructura, proteja el borde de aguas abajo de la estructura contra socavación, y proporcione pasos para los peces donde se necesite.
- Llevar a cabo el mantenimiento programado para estar preparado en el caso de tormentas. Asegúrese de que las alcantarillas estén a su máxima capacidad, de que las cunetas estén revestidas y limpias (Foto 3.5), y de que los canales estén libres de escombros y de maleza que pudieran obstruir a las estructuras. Mantenga bien conformada la superficie de la calzada para dispersar el agua rápidamente y evite las zonas donde se concentra el agua.
- Mantener los taludes de cortes y terraplén con la mínima inclinación posible y bien cubiertos (estabilizados) con vegetación a fin de minimizar tanto los desprendimientos como la erosión superficial. Sin embargo, los taludes verticales que minimizan el área expuesta pueden resistir mejor la erosión superficial para suelos altamente erosivos pero que estan bien cimentados.
- Usar vegetación con raíces profundas para la estabilización biotécnica de taludes. Use una combinación de cobertura vegetal de buena calidad con plantas de raíces profundas, de preferencia especies nativas, para minimizar la inestabilidad del suelo a gran profundidad, así como para ofrecer protección contra la erosión superficial.

Foto 3.8 Estabilice los caminos y senderos de arrastre de troncos después de concluir su uso, mediante caballones desviadores y aplique cubiertas de vegetación u otros tipos de medidas para el control de la erosión.

Prácticas Recomendadas

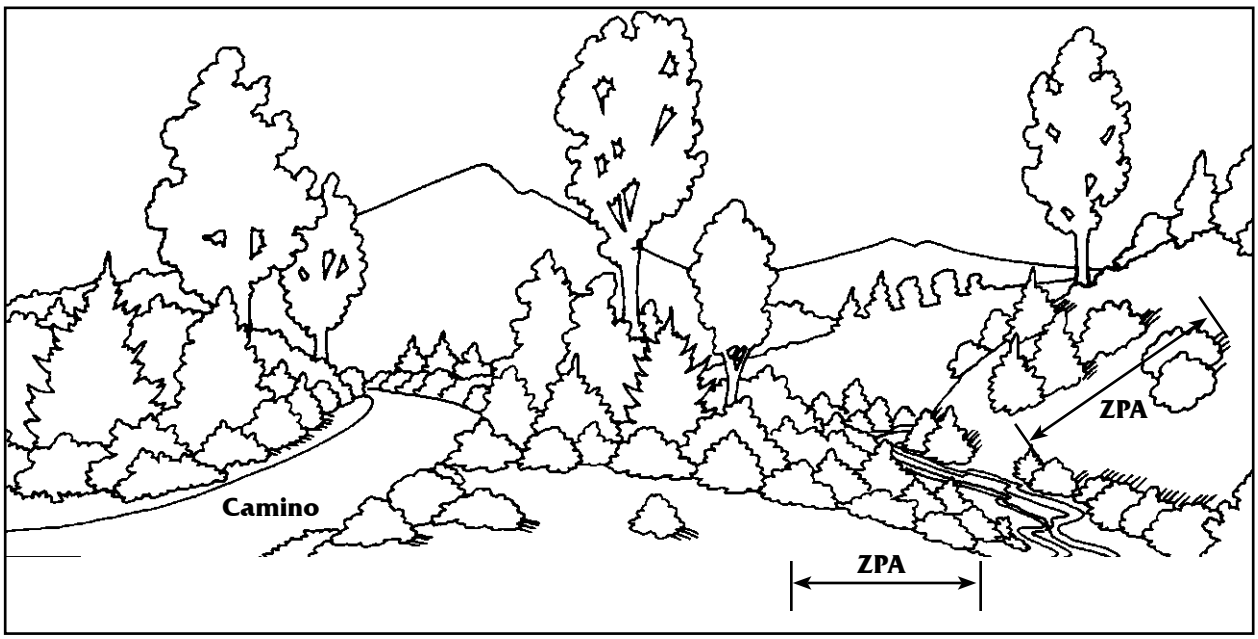
- Diseñar y ubicar los principales caminos y senderos de arrastre antes de dar inicio a las operaciones de explotación forestal.
- Ubicar los caminos de arrastre de tal manera que se adapten al contorno del terreno natural.
- Arrastrar con malacates desde la zona ZPA o desde áreas con taludes empinados, para evitar el movimiento del equipo en estas zona
- Ubicar los caminos y senderos de arrastre de tal manera que el agua acumulada en el sendero de arrastre no se vaya a concentrar en la plataforma de carga de troncos ni en los arroyos (Foto 3.9).
- Cruzar los drenajes naturales en ángulos rectos con respecto a los caminos de arrastre.
- Construir los caminos de arrastre con pendientes ondulantes y con quiebres en la pendiente.
- Estabilizar los caminos y senderos de arrastre con caballones desviadores y cubrir el terreno desnudo con desechos de la tala de árboles una vez que cesen las operaciones a fin de minimizar la erosión de los suelos expuestos (Foto 3.8).
- Construir los caminos de arrastre con pendientes de 15% o menores excepto en distancias cortas (20 metros) para las cuales son aceptables (pendientes) de 30%.
- Poner fuera de servicio o cierre los caminos de arrastre una vez concluidas las operaciones de remoción de la madera.

Prácticas Que Deben Evitarse

- Contaminar los suelos forestales con combustibles y lubricantes.
- Localizar plataformas de carga de troncos y caminos de arrastre dentro de la ZPA.
- Usar los arroyos como senderos de arrastre de troncos.
- Construir caminos de arrastre en senderas escarpadas o con fuertes pendientes en el camino.
- Operar equipos de arrastre dentro de la ZPA.
- Realizar operaciones de tala y cosntrucción en temporada de lluvias.

- Ubicar los puentes y otras estructuras hidráulicas en secciones estrechas de los ríos y en zonas subyacidas por roca sana, donde sea posible. Evite depósitos aluviales finos (p.e.: de arena fina y limo), que son susceptibles a la socavación y son problemáticos, o que de otra manera implicarían la construcción de cimentaciones costosas. Evitar acopios en medio del canal.
- Diseñar los puentes y alcantarillas críticos con vados reforzados cercanas a la estructura, a fin de poder resistir el desbordamiento, un punto controlado de "falla" (fusible) que resulte fácil de reparar. Alternativamente, sobredimensione la estructura y permita la existencia de un borde libre adicional en el caso de puentes, para maximizar la capacidad y minimizar el riesgo de taponamiento. Por otro lado, evite estrechar el canal natural.
- Asegurarse de que el diseño estructural de puentes, muros de contención y otras estructuras críticas incorporan

Figura 3.4 Anchos de la Zona Protectora de Agua (ZPA), en función de la pendiente del talud . (Vea Tabla 3.1)



Zonas Protectoras de Agua

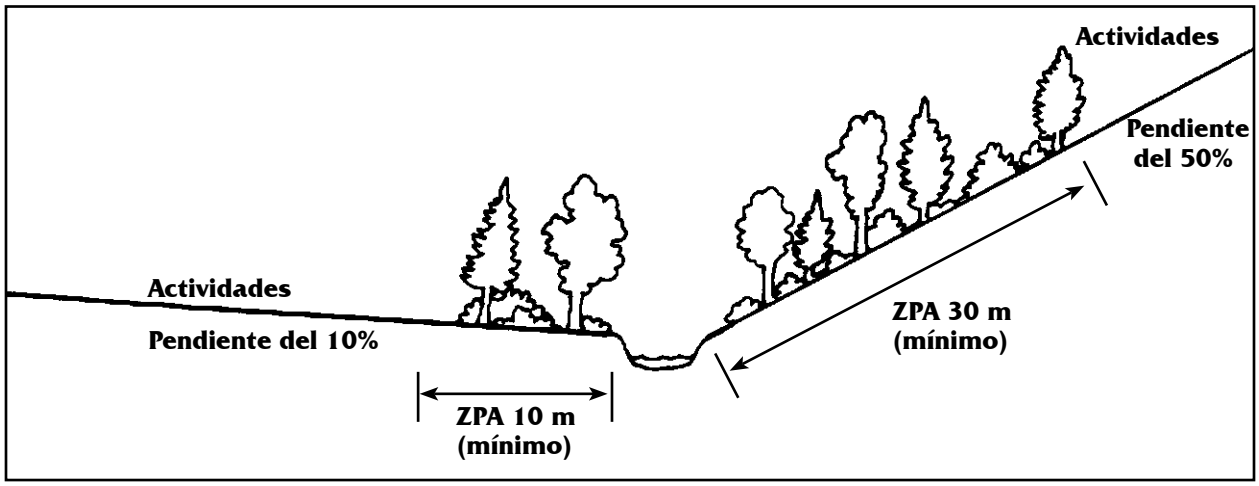


Tabla 3.1

Anchos Mínimos Recomendados para las ZPA's	
Pendiente del Terreno	**Ancho de la ZPA**
0 - 20 %	10 m
21 - 40 %	20 m
41 - 60 %	30 m
60% +	40 m

**Nota - El ancho de la ZPA indicado deberían ser prácticamente duplicado en zonas con suelos altamente erosionables, en zonas con suelos desnudos o con un mínimo de retenedor vegetal, en zonas con lluvia intensa y cerca de arroyos sensibles con peces.*

criterios adecuados de diseño sísmico y construya buenas cimentaciones para evitar fallas durante temblores.

- Colocar estructuras de contención, cimentaciones y medidas de estabilización de taludes sobre roca sana o sobre material firme colocado in situ con buena capacidad de carga para reducir la socavación, en vez de ubicar estas estructuras sobre suelos coluviales de poco espesor o sobre materiales de relleno sueltos.

ADMINISTRACIÓN DE ZONAS PROTECTORAS DE AGUA

Las Zonas Protectoras de Agua (ZPA), o reservas ribereñas, son aquellas áreas adyacentes a arroyos naturales y a ríos que demandan una atención especial durante la construcción o durante las operaciones de explotación maderera. Estas ZPA constituyen una protección importante de la calidad del agua al actuar como zonas amortiguadoras para filtrar la sedimentación que puede resultar de la construcción del camino y de otras actividades de alteración del terreno, tales como la tala de árboles o la explotación de canteras.

Tal vez no haya necesidad de suprimir actividades a lo largo de las ZPA, pero deben minimizarse y modificarse para garantizar que los canales de los arroyos y las márgenes de los mismos estén protegidos contra alteraciones, como se muestra en la Figura 3.3. El ancho de la ZPA variará de acuerdo con el talud del terreno natural a cada lado del arroyo y con el potencial de erosión del suelo (véase Figura 3.4). Mientras más escarpados estén los taludes del terreno natural, más aumentará la posibilidad de que los sedimentos lleguen al arroyo. En la Tabla 3.1 se establece el ancho mínimo recomendado de la ZPA. El ancho real de la ZPA debería determinarlo el administrador local de la zona o un grupo interdisciplinario de trabajo, tomando como base las leyes y reglamentos locales, así como la inclinación del talud, el tipo de suelo, la cubierta vegetal y la sensibilidad del área (Foto 3.6).

EXPLOTACIÓN MADERERA

Las actividades de explotación maderera deben llevarse a cabo de manera que se garantice la protección a largo plazo de la calidad del agua. La tala de árboles requiere de caminos de acceso y de plataformas de carga para poder llevar los productos forestales a los mercados. Los diferentes tipos de explotaciones forestales necesitan distintas especificaciones de caminos y de separación entre caminos para poder ser lo más eficientes. En términos generales, los caminos y las plataformas de carga (que no sean las operaciones de arrastre y de acarreo) son los que poseen el más alto potencial de afectar la calidad del agua. Cuando se toma las precauciones necesarias, se puede minimizar tanto la erosión como la sedimentación.

- **Separación entre caminos** La eficiencia total de la explotación forestal es una combinación de costos de tala de los árboles y de costos de los caminos. El arrastre de troncos con animales es efectivo en distancias cortas de acarreo e implica una red densa de caminos y de plataformas de carga, mientras que el acarreo con helicópteros puede resultar efectivo a distancias mucho mayores y por lo tanto se usan separaciones más amplias de caminos y de plataformas de carga.
- **Especificaciones de caminos** El tipo de sistema de explotación usado determina el tamaño y la localización de los caminos forestales. En general, el tipo de vehículo de acarreo determina las especificaciones del camino en cuanto a ancho, superficie de rodamiento, alineamiento, pendiente, y posición del talud. En algunos casos, una pieza grande de equipo de explotación, como puede ser un cabrestante de remolque con cable,puede necesitar criterios especiales para definir las especificaciones del camino. El tamaño y ubicación de las plataformas de carga también queda determinado por el tipo de sistema de explotación y además por otros factores tales como el volumen y tipo de producto. Para los sistemas de alta producción harán falta plataformas de carga más grandes y mejor estabilizadas y protegidas, en comparación con las necesarias para sistemas de baja producción. Las plataformas de carga más grandes y los sistemas de más alta producción tienen un mayor potencial de causar efectos negativos en la calidad del agua.

- **Plataformas de carga de troncos.** Las plataformas de carga de troncos deberán ubicarse de tal forma que el movimiento del suelo producido por la descarga y por las operaciones de arrastre sea minimizado, tanto durante las operaciones de tala de árboles, como después de ellas. Se debe planear la aplicación de medidas de control de la erosión a fin de estabilizar efectivamente el embarcadero usando la nivelación del terreno para controlar el escurrimiento de agua, los caballones desviadores y la reforestación u otro tipo de cubierta de protección del terreno.
- **Caminos de arrastre y senderos de arrastre.** Debe realizarse de tal modo que se minimice la alteración del suelo. Los senderos de arrastre y los caminos de arrastre construidos pueden afectar en gran medida el suelo y los recursos hídricos. Se debe tener cuidado y prestar atención a los caminos de arrastre de la misma manera que para los caminos de camiones; en ambos tipos de caminos se aplican las mismas Mejores Prácticas de Gestión.

Foto 3.9 Ubicar los caminos y senderos de arrastre furera de los ríos y lagos. Este camino está demasiado cerca del río. Los sedimentos producidos en el camino llegarán al río.

Capítulo 4

Ingeniería de Caminos Rurales: Planificación, Ubicación, Levantamiento Topográfico, Diseño, Construcción, Mantenimiento y Cierre

"Se obtiene lo que se inspecciona, no lo que se espera."

Se considera como camino rural a una vía que se usa relativamente poco (tránsito diario promedio de menos de 400 vehículos por día), que tiene bajas velocidades de diseño (típicamente menores de 80 kph), y geometría correspondiente. Un sistema de caminos rurales bien planeado, localizado, diseñado, construido y mantenido, resulta esencial para el desarrollo comunitario, para el flujo de bienes y servicios entre las comunidades, y para las actividades de gestión de recursos. Sin embargo, los caminos, y sobre todo la construcción de caminos, pueden producir más erosión en el suelo que la mayor parte de otras actividades que tienen lugar en zonas rurales. Con una planificación y un diseño adecuados del sistema de caminos se podrán minimizar los efectos adversos sobre la calidad del agua. Los sistemas de caminos pobremente planeados pueden llegar a tener altos costos de mantenimiento y de reparación, pueden contribuir a una erosión excesiva y pueden no satisfacer las necesidades de los usuarios.

Resulta muy importante desde el principio ubicar a los caminos sobre terreno estable, en taludes moderados, en zonas secas alejadas de drenajes, y apartados de otras zonas problemáticas y difíciles. Al evitar las zonas problemáticas se pueden ahorrar importantes costos de diseño, construcción y mantenimiento, y se pueden minimizar muchos impactos indeseables.

Para que un proyecto de caminos tenga éxito, cada uno de los pasos del proceso de gestión de caminos debe llevarse a cabo. Las etapas básicas son las siguientes:

- Planificación
- Ubicación
- Levantamiento Topográfico
- Diseño
- Construcción
- Mantenimiento

Si se llega a omitir una de estas etapas, el comportamiento de un camino puede resultar deficiente, incumplir sus expectativas, fallar prematuramente, o causar impactos de mantenimiento o ambientales innecesariamente altos. Sin una planificación y una buena ubicación, un camino puede no servir adecuadamente a sus usuarios o pueden ubicarse en una zona problemática. Hace falta el levantamiento topográfico y el diseño para adecuar el camino al terreno y hacer que funcione correctamente. Con una buena construcción se garantiza que el diseño sea implementado y se construya con cierto grado de control de calidad. El mantenimiento es necesario para mantener la superficie conducible

Mejores Prácticas de Gestión

Entre algunas de las Mejores Prácticas de Gestión (MPG) claves aplicadas al diseño y construcción de caminos, se pueden mencionar las siguientes:

- Minimizar el ancho del camino y el área alterada;
- Evitar la alteración de los patrones naturales de drenaje;
- Proporcionar drenaje superficial adecuado;
- Evitar terrenos escarpados con taludes de más de 60%;
- Evitar problemas tales como zonas inundadas o inestables;
- Mantener una distancia o separación adecuada de riachuelos y minimizar el número de cruces de drenaje;
- Minimizar el número de "conexiones" entre caminos y corrientes de agua, y minimizar el "potencial de desvío";
- Diseñar los cruces de arroyos y ríos con la suficiente capacidad, con protección de las márgenes contra la erosión, y permitiendo el paso de peces en todas las etapas de su vida;
- Evitar la constricción del canal activo del arroyo (ancho con el caudal máximo);
- Conseguir una superficie del camino estable y estructuralmente sana;
- Instalar subdrenaje donde se necesite;
- Reducir la erosión colocando cubiertas vegetales o físicas sobre el terreno en cortes, terraplenes, salidas de drenajes y cualquier zona expuesta o alterada;
- Usar ángulos de talud estables en cortes y terraplenes;
- Usar medidas de estabilización de taludes, estructuras y obras de drenaje conforme se necesiten;
- Aplicar técnicas especiales al cruzar praderas, zonas ribereñas, y cuando se tienen que controlar las barranquillas;
- Proporcionar un mantenimiento minucioso y periódico del camino;
- Cerrar o poner fuera de servicio a los caminos cuando no se usen o cuando ya no se necesiten.

y los drenajes funcionen correctamente. Por último, es posible que un camino malo tenga que reconstruirse o cerrarse (ponerlo fuera de servicio) a fin de eliminar los problemas inaceptables.

PLANIFICACIÓN DE CAMINOS

La planificación y el análisis de caminos son actividades clave para garantizar que un camino satisfaga las necesidades presentes del usuario, que no esté

Prácticas Recomendadas

Planificación

- Realizar el análisis de transporte para el camino, a fin de determinar el sistema de caminos óptimo para una cierta zona, así como las necesidades de los usuarios y la evaluación de las opciones futuras.
- Mantener las especificaciones mínimas de caminos congruentes con las demandas y necesidades de los usuarios, con los Objetivos de Gestión de Caminos y con la seguridad pública.
- Usar un enfoque de Equipo Interdisciplinario de trabajo para la planificación de caminos y coordinar el desarrollo con los propietarios locales de la tierra.
- Usar mapas topográficos, fotos aéreas, información de suelos, etc. para la planificación de la ruta óptima.
- Considerar necesidades de acceso de los usuarios del camino, tanto a corto plazo como a largo plazo.
- Limitar el área total alterada al minimizar el número, ancho y longitud de los caminos.
- Usar los caminos existentes únicamente si satisfacen las necesidades a largo plazo de la zona y si se pueden reconstruir para proporcionar drenaje adecuado y seguridad.
- Minimice el número de cruces de arroyos.

sobrediseñado, que minimice los impactos al medio ambiente y a la gente a lo largo del camino y que tome en cuenta las necesidades futuras de una región. Con los objetivos de Gestión de Caminos se ayuda a definir y a documentar la finalidad del camino, las especificaciones y la manera en que un camino se va a usar, administrar, mantener y financiar, así como las prácticas BMP aplicables al camino.

UBICACIÓN DE CAMINOS

La ubicación de los caminos es clave para garantizar que un camino se ubica en una zona adecuada, que se evitan rasgos o zonas problemáticas en las que la construcción es muy costosa, que constituye el mejor acceso a zonas en donde hace falta el camino, y que minimiza la distancia de recorrido entre puntos de destino. Coloque marcas o banderolas a lo largo de la ruta propuesta para el camino a fin de garantizar que cumple con los criterios de diseño del camino (Foto 4.1).

Resulta mucho mejor tener un mal camino en una buena ubicación, que un buen camino en un lugar inadecuado. Un mal camino se puede arreglar. Una mala ubicación no puede cambiarse. La mayor parte de la inversión en el camino malo se puede recuperar, pero si la ubicación es mala, ¡muy poco o nada se puede recuperar!

Foto 4.1 Planee y localice los caminos usando puntos topográficos de control y los rasgos del terrenos natural. ¡Verifique sobre el terreno la ubicación y alineamiento del camino!

Prácticas Recomendadas

Ubicación

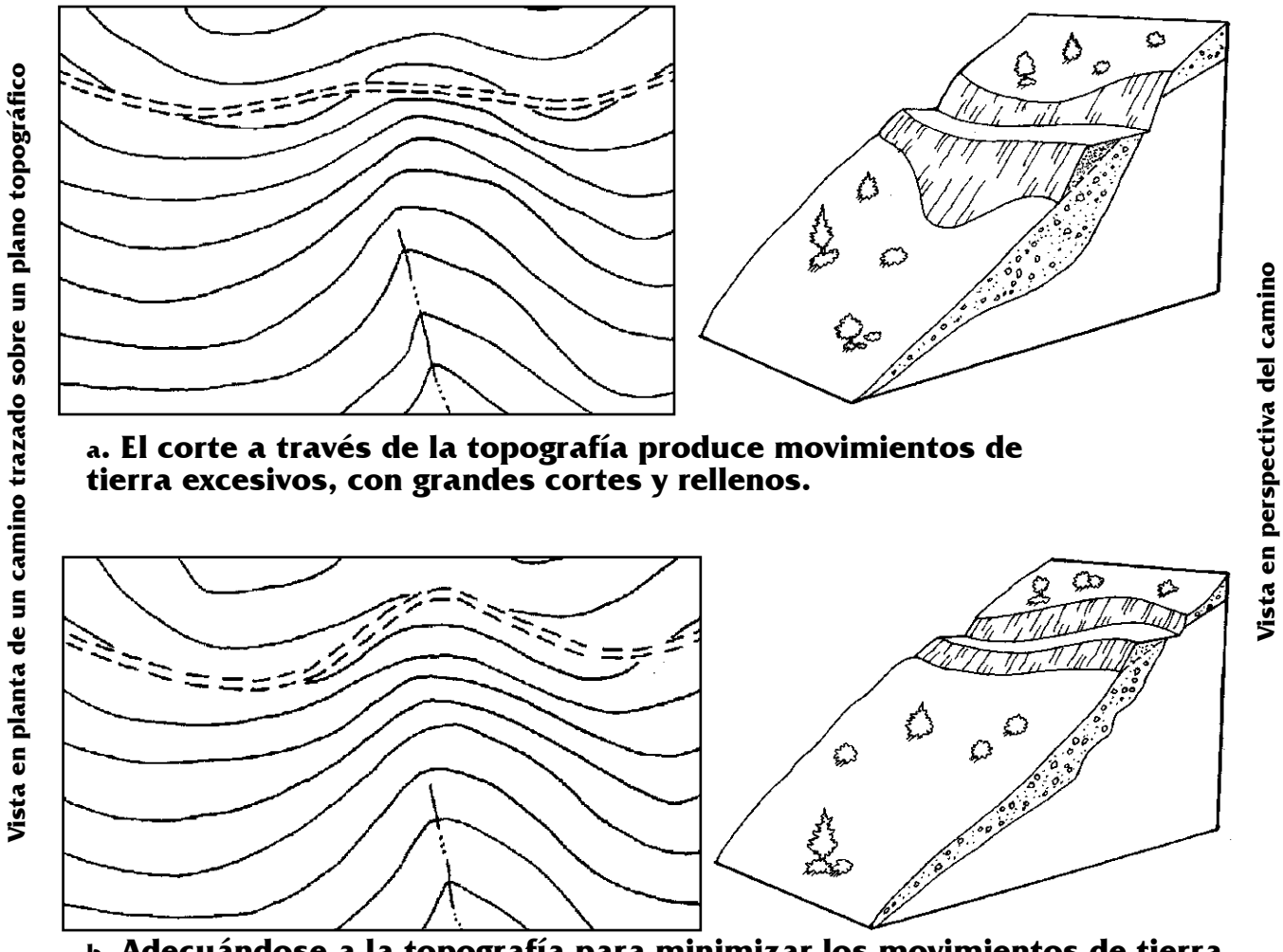
- Usar puntos topográficos de control y rasgos físicos para controlar o definir la ubicación ideal para el camino. Use bordes del terreno, siga por las protuberancias del terreno y evite los afloramientos de roca, las laderas abruptas, los cruces de arroyos, etcétera.
- Ubicar los caminos a fin de evitar los efectos adversos sobre la calidad del agua y fuera de las zonas ribereñas y de las zonas SMZ, excepto en los cruces con arroyos. Aproxímese a los cruces de arroyos con la menor pendiente posible.
- Ubicar los caminos en la parte alta de la topografía para evitar taludes empinados interiores hacia los cañones y deje una mayor distancia entre el camino y los arroyos.
- Ubicar los caminos en suelos con buen drenaje y en laderas donde el drenaje fluirá alejándose del camino.
- Ubicar los caminos de modo que sigan el terreno natural adecuándose al contorno del sitio, con pendientes ondulantes y minimizando los cortes y los rellenos (Figura 2.1 y Figura 4.1) (Foto 4.2).
- Ubicar los caminos, caminos en zigzag y las plataformas de carga de troncos, sobre secciones en balcón y en terrenos relativamente planos.
- Evitar ubicaciones problemáticas, tales como manantiales, zonas inundadas, deslizamientos de tierras, laderas escarpadas, afloramientos masivos de roca, llanuras de inundación y suelos altamente erosivos.
- Evitar terrenos muy abruptos (más de 60%) y terrenos demasiado planos en los que el drenaje resulte difícil de controlar.

LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS

Son las etapas dentro del proceso en las cuales se combinan las necesidades de los usuarios del camino con los factores geométricos y los rasgos topográficos, y el camino se construye sobre el terreno. Es necesario el levantamiento topográfico del camino o del sitio para identificar los rasgos topográficos tales como drenajes, afloramientos y pendientes del terreno, así como para agregar un cierto nivel de control geométrico a un proyecto.

Foto 4.2 Localice los caminos de tal manera que se adapten a la configuración del terreno natural y deje ondulaciones que permitan dispersar el agua frecuentemente.

Figura 4.1 Alteraciones del alineamiento del camino en función de la topografía. Este dibujo fué realizado originalmente por Tom Spittler de California Division of Mines and Geology (CDMG).



Prácticas Recomendadas

Diseño general

- Usar las especificaciones mínimas de caminos necesarias para la seguridad y el tránsito (Tabla 4.1).
- Usar planos y especificaciones estandarizadas, con dibujos estándar, para el trabajo de construcción mas típico. Desarrollar especificaciones y planos especiales de proyecto para tipos de trabajo únicos.
- Extraer toda la madera que se pueda comercializar del derecho de vía del camino antes de proceder a las excavaciones. Acopiar el material en los lugares establecidos para ese fin.
- En zonas comunales y urbanas, construir sendas para peatones a la orilla del camino para la seguridad de la gente que camine a lo largo del mismo. Aplicar un tratamiento superficial al camino y colocar reductores de velocidad (topes), para controlar el polvo y la velocidad del tránsito, respectivamente.
- Construir caminos con pendientes de 12% o menores, usando tramos cortos con 15% de inclinación donde sea necesario. ¡En el caso de caminos empinados, el drenaje resulta difícil de controlar (Foto 4.3)!
- Construir el camino con el ancho mínimo suficiente para que los vehículos puedan circular con seguridad, normalmente comprendido entre 3,5 y 4,5 metros para caminos de un solo carril y de 5 a 7 metros para caminos de doble circulación. Minimizar el área de despalme.
- Ubicar los caminos con un radio de curvatura mínimo de 15 metros.

Materiales

- Compactar los terraplenes del camino, el material de la subrasante y los materiales de la superficie de rodadura, sobre todo en el caso de zonas sensibles (Foto 4.4), o permita que los nuevos caminos se "asienten" durante varias semanas antes de poner en uso el camino. En climas húmedos, resulta deseable un periodo más largo.
- Usar medidas de estabilización de la superficie del camino, como el uso de agregados o la colocación de pavimentos, donde sea necesario y tan a menudo como sea posible (Foto 4.5). Utilizar materiales duraderos que no se degraden a sedimientos finos bajo condiciones de tráfico.
- Deshacerse del material de excavación inadecuado o sobrante en sitios que van a minimizar la degradación de la calidad de agua y otros impactos adversos a los recursos.
- Establecer requisitos mínimos de muestreo y ensayo y programe las pruebas de control de calidad de los materiales.

Taludes

- Típicamente construir los taludes de corte con inclinaciones de 3/4:1 o menores. Construir los taludes de terraplén con pendientes de 1½:1 o menores. Reforestar los taludes.
- En general, usar construcción balanceada de cortes y rellenos en terrenos de suave pendiente. Usar construcción totalmente en balcón en laderas de más de 65% y transporte el material excavado hasta un sitio adecuado de desecho.
- En terrenos muy abruptos construir caminos angostos (entre 3 y 4 metros de ancho) con apartaderos, o usar muros de contención, según sea el caso. Transportar la mayor parte del material excavado hasta su destino final, evite desecharlo a los lados.

Drenaje

- Construir la superficie del camino con peralte hacia afuera de 3-5% para pendientes del camino de menos de 10% en suelos estables, usando vados ondulantes superficiales para estructuras de drenaje transversal. En suelos resbalosos, usar el peralte hacia adentro del camino o agregar un revestimiento de agregados a la superficie del camino.
- Construir cunetas sólo cuando sea necesario. Un camino con peralte hacia fuera y sin cunetas altera menos el terreno y su construcción es menos costosa.
- Construir la superficie del camino con peralte hacia adentro de 3-5%, con un tramo en cuneta para el caso de pendientes del camino mayores de 10% o en zonas con taludes naturales empinados, suelos erosionables o resbalosos, o en curvas pronunciadas. Instalar drenaje transversal

Prácticas Recomendadas (continuación)

mediante tubos de alcantarilla o vados ondulantes superficiales.

- Usar una sección transversal del camino con corona en una calzada ancha con taludes suaves o sobre terreno plano para evitar la acumulación del agua en la superficie de rodadura. (Figura 7.1)
- Construir caminos con pendientes ondulantes para minimizar la concentración de agua.
- Proporcionar franjas filtrantes o áreas de infiltración para atrapar a los sedimentos entre las salidas de drenaje y los arroyos. ¡**Mantener caminos y arroyos desconectados!**
- Usar estructuras de drenaje del tipo adecuado y con las dimensiones apropiadas para los cruces con los arroyos naturales. Diseñar los puentes y las alcantarillas para que sean lo suficientemente grandes como para evacuar el caudal máximo (suficente ancho para pasar el flujo). Emplear revestimiento, muros de cabeza, rejillas, etc. como medidas necesarias para proteger a las estructuras (Foto 4.6).
- Desviar el agua y el caudal del arroyo alrededor de las zonas de construcción siempre que sea necesario para mantener seco el sitio de la obra y para evitar la degradación de la calidad del agua. Restaurar los canales naturales a su estado original tan pronto como sea posible después de terminada la construcción.

Control de erosión

- Se debe retirar el desperdicio maderero, las copas y los troncos de los árboles, así como los tocones, del derecho de vía al pie del talud del relleno, antes de proceder a la excavación para control de erosión (Figura 4.2). La cantidad de material puede estar limitada por riesgo de incendios forestales.
- Exigir un plan final de control de erosión y la aplicación de medidas internas de control de erosión durante cierres estacionales. Estabilizar todas las áreas alteradas, los sitios de trabajo, los caminos temporales, etc. Incluir planos típicos de las trampas de sedimentos, las barreras de maleza, las barreras contra azolves, las estructuras biotécnicas, etcétera.

Otros aspectos a considerar

- Explotar fuentes locales confiables de agua para la construcción del proyecto y para las necesidades de mantenimiento donde sea posible hacerlo. Construir un sitio estabilizado, bien ubicado y durable que permita proteger la calidad del agua y la vida acuática. La programación y el volumen de agua extraído pueden ser motivo de control.
- Usar técnicas constructivas que resulten más adecuadas y efectivas en cuanto a costo para el proyecto y para el área geográfica, usando equipo o trabajo manual (Foto 4.7).
- Aplicar las mejores y más adecuadas tecnologías disponibles, tales como GPS (Global Positioning System), programas de computadora personal, geotextiles, medidas de control biotécnico de la erosión, estructuras térreas de contención estabilizadas mecánicamente, materiales para estabilización de suelos, etc., donde sea necesario en los caminos rurales.
- Minimizar las actividades de movimiento de tierras cuando los suelos estén muy húmedos o muy secos, o ante amenazas de tormentas. Programar la construcción del camino y el uso de éste durante estaciones más templadas y más secas, siempre que esto sea posible (Foto 4.8).
- Usar dispositivos de control del tránsito en caso necesario para proporcionar seguridad al personal de construcción y a los usuarios del camino.
- Hacer visitas al sitio durante las fases tanto de diseño como de construcción de un proyecto. Asegurarse de que cuenta con inspectores adecuados, con vehículos y con pruebas de control de calidad para supervisar **que las obras se construyan correctamente**.

Tabla 4.1

Normas Típicas de Diseño para Caminos de Bajo Volúmen de Tráfico		
Elemento de diseño	**Camino rural de acceso**	**Camino alimentador**
Velocidad de Diseño	25 - 35 kph	45 - 60 kph
Ancho del camino	3,5 - 4,5 m	4 - 5,5 m
Pendiente del camino	15% max.	12% max.
Radio de curvatura	15 m min.	25 m min.
Corona/Peralte	Hacia adentro/afuera (5%)	Hacia adentro/afuera (5%)
Tipo de superficie	natural o grava	grava, empedrado o pavimento

Foto 4.3 Evite la construcción de caminos con pendientes fuertes o en laderas empinadas. Resulta dificil controlar el drenaje cuando la pendiente del camino es muy pronunciada.

Foto 4.4 Compacte la superficie de la calzada y el material de relleno cuando el camino se localice cerca de arroyos, sobre laderas escarpadas o en zonas con suelos erosionables.

Factores Clave de Costos

- Las laderas empinadas (particularmente en caminos anchos) rápidamente aumentan los volúmenes de obra, incluida el área necesaria para despalme y reforestación, y el material excavado. De ahí que los taludes de fuerte pendiente en el terreno natural aumenten el costo de la construcción (véase la Figura 4.3 y la Tabla 4.2).

- Los materiales con especificaciones altas para la superficie de rodadura (agregados, asfalto, etc.) aumentan considerablemente el costo del camino, aunque también mejoran grandemente el confort del usuario del camino y reducen la erosión de la superficie del camino.

- Los cruces de drenaje (de arroyos) frecuentes o en gran número aumentan considerablemente los costos del camino –pero son necesarios, sobre todo en terrenos bisectados.

- Las pendientes pronunciadas aumentan los costos de mantenimiento a largo plazo del camino

Foto 4.5 Camino estable para acarreo de troncos con superficie de agregados. Use materiales para revestimiento de caminos tan frecuentemente como sea posible, para disminuir la erosión, mejorar el soporte estructural de la base del camino y el confort del conductor.

Foto 4.6 Una alcantarilla bien diseñada e instalada con muros de cabecera, para mejorar la eficiencia y para la protección o retención del material de relleno.

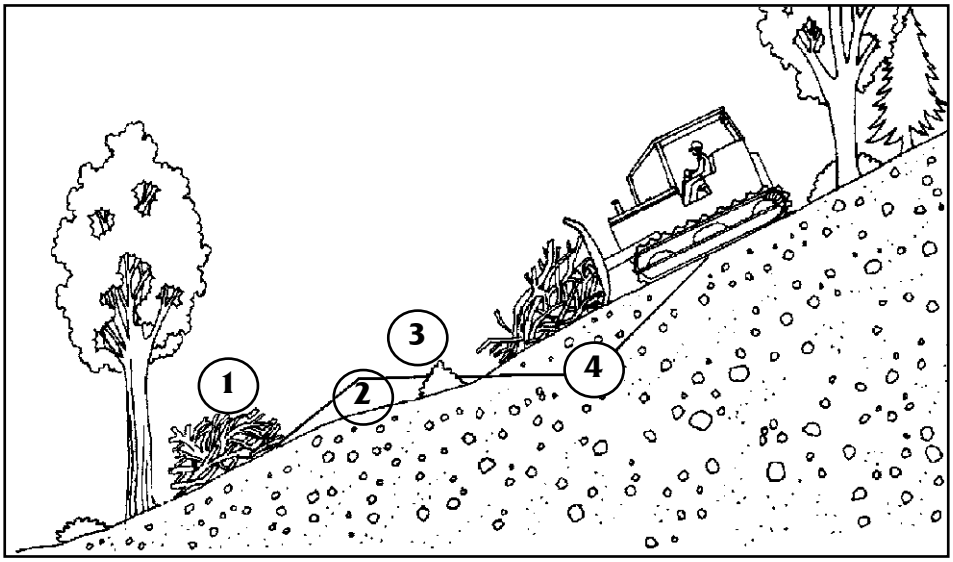


Figura 4.2 Camellones de maleza construidos al pie de un talud de relleno para controlar la erosión. Coloque la maleza antes de dar inicio a la excavación. No entierre la maleza dentro del terreno.

1. Ramas pequeñas y maleza de desmonte, aplastadas al pie del relleno
2. Relleno
3. Camino en construcción
4. Corte

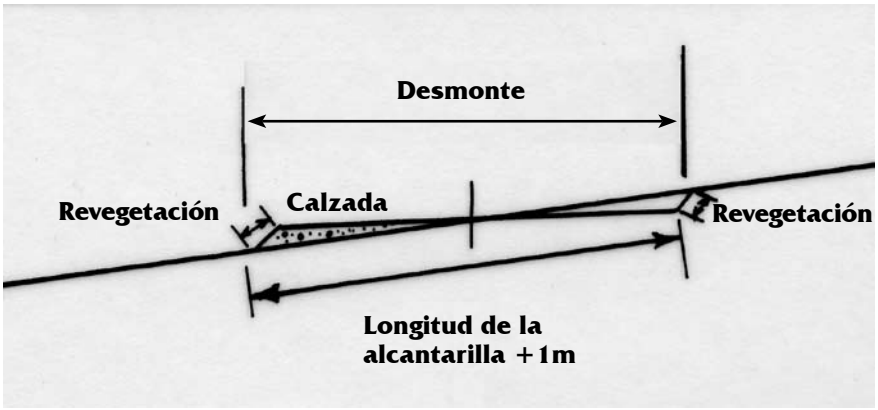
Foto 4.7 Aplique las técnicas de construcción de caminos que sean más costo-efectivas en cuanto a costo para el proyecto y el área geográfica en particular. La comparación de la mano de obra contra el uso de equipo depende de los costos, la disponibilidad del equipo y las tasas de producción.

Prácticas Que Deben Evitarse

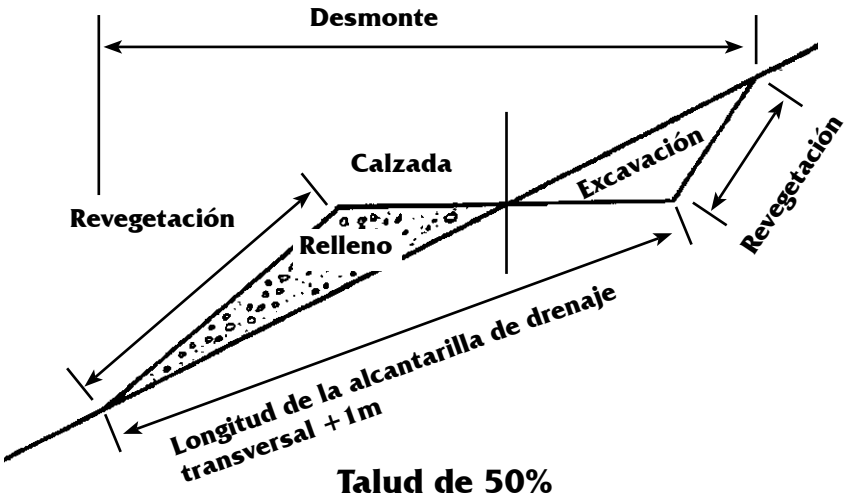
Diseño general

- Construir el camino en laderas escarpadas.
- Colocar material a volteo en laderas transversales inclinadas más de 50 a 60%.
- Enterrar tocones, troncos, desperdicio maderero o desechos orgánicos en el material de relleno o en el prisma del camino.
- Actividades de construcción y de explotación de recursos durante periodos lluviosos (véase Foto 4.8).
- Pendientes empinadas en el camino (más de 12-15%). Resulta muy difícil controlar el agua.
- Cortes verticales, sobre todo en caminos con cunetas interiores.
- Zonas muy planas (en las que el drenaje no se puede controlar).
- Ubicación de caminos dentro de llanuras de inundación, zonas ribereñas, pantanos, o dentro de la ZPA (excepto en cruces).
- Zonas húmedas y de manantiales, zonas de deslizamientos y grandes afloramientos de roca.
- Construcción de proyectos con fondos insuficientes para un adecuado diseño, construcción, inspección, y mantenimiento futuro. Considere la posibilidad de construir menos kilómetros de caminos pero que estén bien hechos.

Figura 4.3 Variación del volumen de obra del camino en función de la pendiente del terreno.



Talud de 10%



Talud de 50%

Tabla 4.2

Cantidades típicas de trabajo y materiales para la construcción de caminos en terrenos con pendientes suaves y fuertes (para un camino de 4,5 m de ancho).

Obra de Trabajo	Talud de 10%	Talud de 50%
Desmonte	0,62 ha/km	0,95 ha/km
Excavación	237 m^3/km	2220 m^3/km
Revegetación (taludes de corte y terraplenes	0,10 ha/km	0,89 ha/km
Longitud alcantarilla (cauce natural)	8 m	22 m
Longitud alcantarilla (cuneta de alivio)	6 m	11 m

Un levantamiento topográfico puede ser muy simple, como el ejecutado con una brújula y una cinta métrica de tela en el caso de un camino rural, o puede resultar muy detallado usando instrumentos y un alto grado de exactitud en terrenos difíciles o para un camino de altas especificaciones.

Entre los elementos de diseño se incluye la geometría de la calzada, la velocidad de diseño, el drenaje, las estructuras para cruzar arroyos, las necesidades de estabilización de taludes, los tipos y usos de materiales, y las pendientes del camino (Tabla 4.1). En la construcción intervienen todos los aspectos de la aplicación del diseño y de la adecuación del proyecto al terreno. Un enlace clave entre el diseño y la construcción lo constituye el uso de **planos y dibujos estandarizados** que muestran la manera en que debería quedar el proyecto, así como las **especificaciones** en las que se describe cómo se debe hacer el trabajo. Otro aspecto clave de la construcción, es el **control de la calidad y la inspección**, para garantizar que el trabajo se lleva acabo de conformidad con los planos y con las especificaciones. Generalmente se especifica un cierto volumen de muestreo y prueba para asegurarse que los materiales empleados en la construcción cumplen con las especificaciones.

Foto 4.8 Evite las actividades de construcción y de otro tipo durante las temporadas de lluvia siempre que sea posible. Alternativamente, añada estabilización de la superficie y del drenaje en zonas de suelos pobres o blandos, para su uso en cualquier tipo de clima.

Aspectos clave del mantenimiento de caminos

Algunos aspectos clave que se deben ejecutar de manera rutinaria son:

- Nivelar y conformar la superficie de la calzada para mantener bien definida una pendiente hacia adentro o hacia afuera o un coronamiento que permita desalojar el agua rápidamente de la superficie de rodadura.
- Compactar la superficie nivelada de la calzada para mantener una superficie dura de rodadura y evitar la pérdida de finos. Reemplazar el material de revestimiento cuando sea necesario. ¡Mantenga humedecida la superficie del camino!
- Remover las roderas a través de los vados ondulantes superficiales y de los caballetes desviadores. Reconfigurar las estructuras para que funcionen debidamente.
- Limpiar las cunetas y reconfigurarlas cuando sea necesario para tener una capacidad de flujo adecuada. ¡No nivele las cunetas que no lo necesiten!
- Retirar los escombros de la entrada de alcantarillas para evitar el taponamiento y el desbordamiento. Revisar que no hayan daños ni indicios de tubificación o de socavación.
- Sustituir o reparar el revestimiento de roca, concreto o vegetación usado para protección de taludes, protección contra la socavación, o disipación de energía.
- Podar la vegetación a los lados del camino (quitar la maleza) para mejorar la distancia de visibilidad y la seguridad del tránsito.
- Sustituir las señales faltantes o dañadas de información sobre el camino, seguridad y reglamentación.

Prácticas Recomendadas

Mantenimiento

- Llevar a cabo el mantenimiento cuando sea necesario. ¡NO ESPERE! Mientras más tiempo se espere mayores serán los daños que podrán ocurrir y las reparaciones serán más costosas.
- Mantener las cunetas y alcantarillas libres de escombros, pero conserve una superficie resistente a la erosión como puede ser el pasto o la roca en el fondo de las cunetas. Retirar los escombros durante las inspecciones (Figura 4.4 y Foto 4.9). También mantener limpios los canales de desbordamiento.
- Renivelar y configurar periódicamente la superficie del camino para mantener un drenaje superficial adecuado (Foto 4.10).
- Mantener humedecida la superficie del camino durante la nivelación. Rellenar las roderas y los baches con grava o con material compactado tan frecuentemente como sea posible (véase la Figura 4.5). Mantener los vados ondulantes superficiales configurados y nivelados. Sería ideal compactar la superficie final nivelada del camino.
- Mantener el lado de bajada del camino libre de bermas, excepto que se construya intencionalmente una berma para controlar agua o tránsito.
- Aplicar un material para estabilizar la superficie, como puede ser agregados, cantos rodados, o pavimentos, a la superficie del camino para proteger a la calzada contra daños y disminuir la frecuencia de mantenimiento necesario.
- Evitar la alteración del suelo y de la vegetación a menos que sea necesario. Dejar la mayor cantidad de vegetación (pastos) en las cunetas, en las zonas del acotamiento del camino, y en los taludes de cortes y rellenos (sobre todo pastos y maleza de tamaño pequeño siempre que sea posible. Sin embargo, asegure vista a distancia y que los drenajes sigan funcionando correctamente.
- Retirar materiales desprendidos de la calzada o del interior de las cunetas donde el material pueda obstruir el drenaje normal de la superficie de la calzada (Foto 4.11).
- Evitar ensanchar el camino o el exceso de inclinación de los taludes de relleno formados al empujar con cuchilla el material superficial fuera del camino.
- Cierre el camino durante condiciones de mucha lluvia o en periodos de inactividad.
- Inspeccionar el camino a intervalos regulares, sobre todo después de periodos de lluvias fuertes.

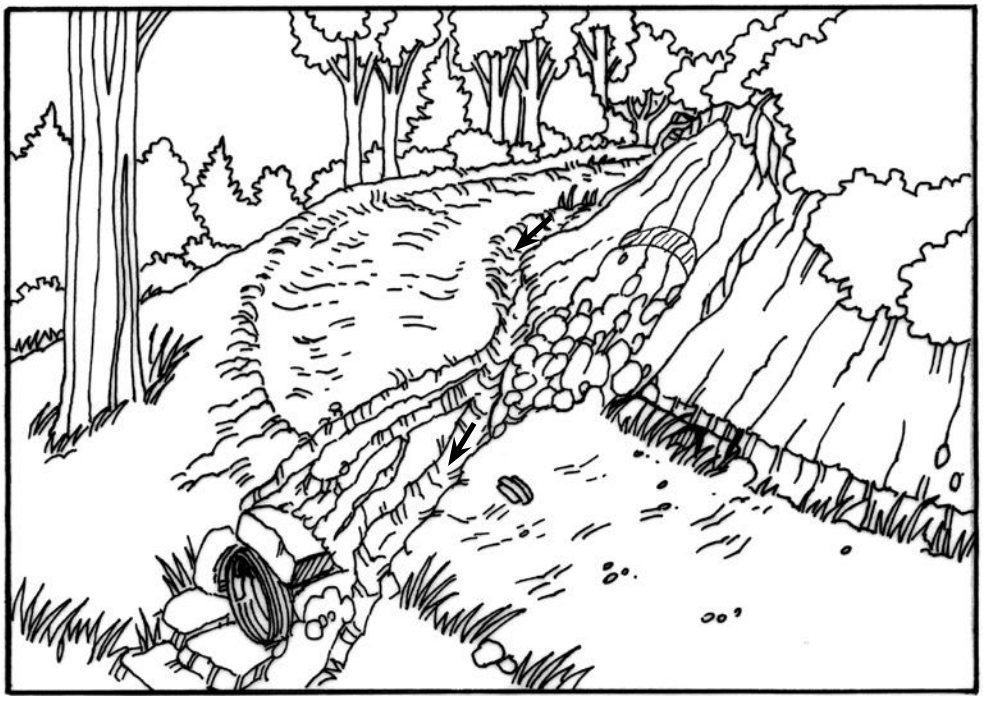


Figura 4.4 El mantenimiento de caminos es necesario para conservar los patrones de drenaje de la calzada y para retirar los deslizamientos que bloquean las cunetas y las entrada de alcantarillas.

Foto 4.9 Realice el mantenimiento del camino, ya sea con equipo o a mano, para conservar la geometría de la calzada y el funcionamiento correcto de las estructuras de drenaje. Mantenga limpias las cunetas, pero no retire la capa de estabilización vegetal (pasto).

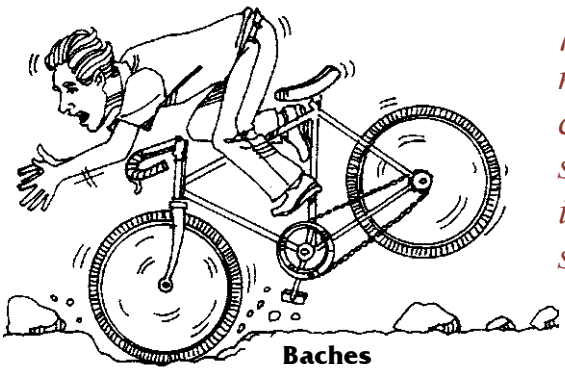
Foto 4.10 Use motonivelador siempre que sea posible para conservar el camino con la geometría correcta y debidamente drenado.

Recuerde: ¡Usted obtiene lo que se inspecciona, no lo que se espera!

COSTOS DEL CAMINO

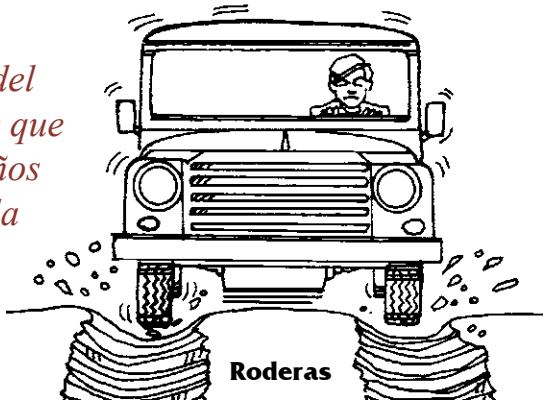
Los costos de la construcción de caminos se ven mayormente afectados por las especificaciones del camino construido, sobre todo el ancho del camino y el tipo de superficie de rodadura, así como la pendiente del terreno. La ubicación de un camino con cortes y rellenos sobre laderas transversales abruptas aumenta mucho el tiempo de construcción, el volumen de excavación y de movimientos de tierra, las zonas de desmonte y de reforestación necesaria, y le agrega longitud a los drenes transversales y a otras estructuras de drenaje. En la *Figura 4.3* se aprecia la diferencia en volúmenes de obra para la construcción del camino sobre una ladera lateral con 10% de pendiente en compara-

Figura 4.5 Evidencias de la necesidad del mantenimiento de caminos. (Adaptado de PIARC Road Maintenance Handbook)

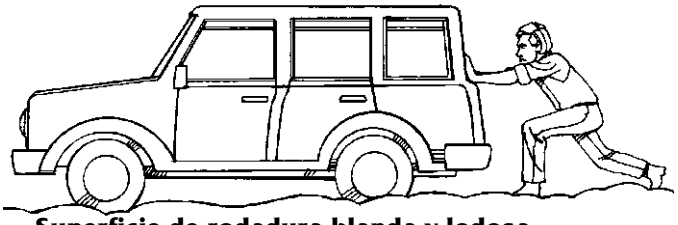


Baches

¡Realice el mantenimiento del camino antes de que se presenten daños importantes en la superficie!



Roderas



Superficie de rodadura blanda y lodosa

Grietas y quebradas

ción con un talud de 50%. En la *Tabla 4.2* se presentan esas cantidades de obra típicas para los aspectos de trabajo más importantes del camino. La construcción ideal es en terrenos con taludes transversales que varían entre 25 y 35 por ciento.

Las estimaciones de costos de caminos son importantes para el proceso de planificación, así como para los presupuestos generales del proyecto a fin de garantizar que se cuenta con los fondos suficientes para poder construir correctamente el camino. Las técnicas adecuadas de diseño y de construcción implican costos iniciales relativamente altos pero pueden reducir en gran medida las necesidades futuras de mantenimiento y evitar costosas fallas, reparaciones e impactos adversos al medio ambiente.

Foto 4.11 Retire el material de los deslizamientos que bloqueen las cunetas de drenaje y que reduzcan el ancho del camino.

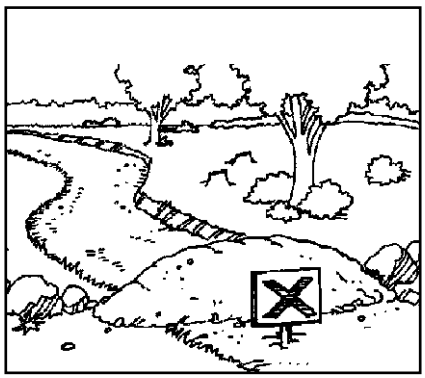
MANTENIMIENTO DEL CAMINO

Los caminos rurales deben mantenerse durante su uso activo, una vez terminadas las operaciones periódicas, y después de ocurrir tormentas importantes, para asegurarse de que las obras de drenaje están funcionando correctamente. Las lluvias fuertes producirán fallas en los taludes de cortes que obstruirán las cunetas, haciendo que el agua escurra sobre la superficie del camino, erosionando ésta y el talud del terraplén (véase la Figura 4.4). Los escombros son arrastrados por los cauces naturales durante las lluvias fuertes y bloquean las estructuras de drenaje, haciendo que el agua desborde sobre el camino y erosionando el relleno. Las roderas, ondulaciones y baches en la superficie de rodadura almacenarán agua, debilitarán la sección estructural de la calzada, acelerarán el daño superficial, y dificultarán el manejo, como se muestra en la Figura 4.5. Es necesario el mantenimiento de rutina en cualquier camino para mantener las condiciones de servicio de éste y que su sistema de drenaje funcione correctamente. Con un camino bien conservado se reducirán los costos de los usuarios del camino, se evitarán daños a la calzada y se minimizará la producción de sedimentos.

Foto 4.12 Cierre los caminos que ya no se necesiten o que se usaron para acceso temporal. Estabilice la superficie con caballones desviadores, bermas y con cobertura vegetal.

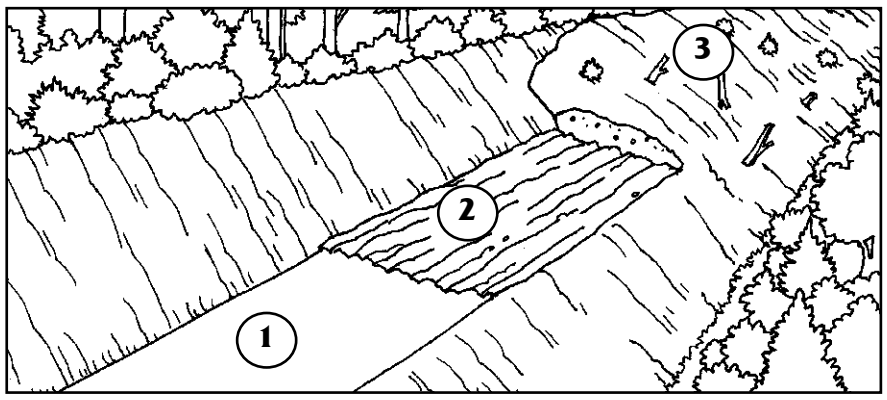
Figura 4.6 Opciones de cierre de caminos, incluyendo cierre temporal (a,b), poner fuera de servicio (c) y cancelación total del camino (d).

a. Cierre con barrera (temporal)



b. Cierre con montón de tierra o con berma (temporal)

c. Puesta fuera de servicio - Cierre permanente del camino mediante escarificación de la superficie y siembra de semillas para reforestación, pero manteniendo la mayor parte de la plantilla del camino (geometría).



d. Cancelación del camino

1. Superficie del camino antes de la cancelación.
2. Durante la cancelación, el antiguo camino es escarificado y rellenado.
3. Cancelación final, con el rellenado y la reconfiguración para recuperar la topografía original, seguido por la reforestación.

La forma en que se le dará mantenimiento al camino debe resolverse antes de que éste se vaya a construir o a reconstruir. El trabajo de mantenimiento se puede lograr ya sea con personal de los organismos estatales o locales, por medio de contratistas, o mediante grupos comunitarios locales. El financiamiento para el mantenimiento puede provenir directamente de los fondos asignados por el organismo operador de caminos, de impuestos locales o sobre la gasolina, de cuotas pagadas por los usuarios del camino, o de mano de obra local donada por los usuarios del camino interesados.

CIERRE DE CAMINOS

Un camino se puede cerrar porque ya no es necesario, como puede suceder al agotarse un recurso o si se ha desplazado una comunidad, cuando no se vaya a usar durante un cierto intervalo de tiempo, o si el camino está representando un alto costo inaceptable de mantenimiento o de afectación al medio ambiente. El cierre de un camino con frecuencia implica la participación del público y de otros usuarios del camino que resulten afectados. Entre las opciones básicas para el cierre de caminos se encuentran las siguientes: **Cierre temporal** o bloqueo con barreras, barricadas o bermas; **Cierre permanente** donde la superficie del camino sea estabilizada y las estructuras de drenaje sean eliminadas, pero dejando en su lugar la plantilla del camino; o **Cancelación del camino** donde se retire en su totalidad la calzada y las obras de

Prácticas Recomendadas

Cierre del camino

- Haga participar a la población afectada o a los usuarios del camino en la toma de decisiones relacionadas con el cierre del camino, en general usando un proceso interdisciplinario.
- Cierre temporalmente los caminos mediante barreras, barricadas o grandes bermas.
- Coloque caballones desviadores (Véase el Capítulo 7, Drenaje) en caminos cerrados para desviar frecuentemente el agua de la superficie del camino.
- Retire todas las estructuras de drenaje y de cruce de arroyos en caminos cerrados permanentemente.
- Cierre los caminos mediante la reconfiguración de la base del camino para mantener los patrones naturales de drenaje superficial y evitar la concentración de agua.
- Reforeste el terreno expuesto en los caminos cerrados. Un tratamiento común incluye escarificación, siembra de semillas y aplicación de cubierta vegetal para promover el crecimiento de pasto y de maleza. Se pueden plantar árboles. En las pendientes, se deberán colocar caballones desviadores.
- Retire las bermas que puedan impedir el drenaje superficial en caminos cerrados.
- Ponga a los caminos fuera de servicio mediante estructuras de cierre, control de drenaje y protección contra la erosión, pero sin volver a configurar la plantilla del camino, si es probable volverlo a usar en el futuro.
- Cancele los caminos siempre que sea posible y donde resulte rentable en cuanto a costos para proporcionar el más alto grado de eliminación del camino y de recuperación del terreno.

drenaje y la zona sea reconfigurada para devolverle su condición natural previa a la construcción del camino. En la Figura 4.6 se muestra la gama de opciones que generalmente se consideran como antecedente al cierre de caminos.

Si ya se terminó el uso provisional del camino, como en el caso de explotaciones forestales o mineras, los caminos se deberán cerrar temporalmente o ponerlos fuera de servicio con el fin de protegerlos contra erosión durante el periodo en que no se vayan a usar. Los caminos cerrados temporalmente deberán bloquearse con una barrera, barricada o berma para evitar el acceso de vehículos, pero deberán conservarse las estructuras transversales de drenaje. La superficie del camino se deberá volver a configurar para que tenga un buen drenaje y se estabilizará con caballones desviadores y posiblemente se escarificará, se sembrará y se le colocará una cubierta retenedora de humedad. Las estructuras permanentes de drenaje tales como alcantarillas y cunetas necesitarán una limpieza periódica. El empleo de técnicas de cierre de caminos y de mantenimiento de rutina una vez concluidas las operaciones permitirá proteger la inversión en el camino hasta que se vuelva a necesitar en el futuro.

El **cierre permanente de caminos** implica el bloqueo del camino, la remoción de todas las estructuras transversales de drenaje y del material de relleno, y la estabilización de la superficie del camino. Esto generalmente se logra al desgarrar la superficie de rodadura (escarificación), para luego sembrar y colocar una cubierta vegetal, de tal manera que el camino se reforeste naturalmente con el tiempo (Foto 4.12). El costo de este trabajo es relativamente bajo, se elimina la mayor parte del daño ambiental producido por el camino, y se mantiene en pie la geometría

Prácticas Que Deben Evitarse

- Dejar las estructuras de drenaje en caminos cerrados (puestos fuera de servicio o cancelados).
- Hacer caso omiso de caminos cerrados temporalmente.

básica de la base del camino para el caso en que el camino eventualmente se vaya a reconstruir en el futuro.

El cerramiento de un camino por remoción es en donde la base del camino se elimina totalmente y el terreno se restaura a su configuración original. Todos los materiales de drenajes transversales se retiran, el terreno se vuelve a configurar, y se restauran los patrones naturales de drenaje, incluyendo idealmente los patrones de flujo del agua subterránea, para terminar con la reforestación de la zona. Resulta particularmente importante retirar todo el material de relleno que se haya colocado en los drenajes, como es el caso de los materiales de respaldo de las alcantarillas. Estas medidas relativamente costosas se aplican idealmente en zonas sensibles tales como parques o reservas, cerca de áreas recreativas, o cerca de arroyos y lagos. Estas medidas resultan muy efectivas para eliminar toda traza de un camino y eventualmente restaurar la zona a su condición natural previa a la construcción del camino. Sin embargo, debido a su alto costo, la simple puesta fuera de servicio de un camino resulta la medida mas costo-efectiva para el cierre de un camino, y es por lo tanto la opción utilizada con mayor frecuencia.

El camino pavimentado (arriba) y el camino revestido (abajo) son caminos de bajo impacto, relativamente bien lozalizados y diseñados, debido a que sus superficies están reforzadas y se adaptan al terreno, para así dispersar efectivamente el agua y evitando movimiento de tierras excesivo.

Capítulo 5

Hidrología para el Diseño de Cruces de Drenaje

"Determine el tamaño de la estructura de drenaje basado en un proceso de diseño racional o estadístico e incorporando experiencia local."

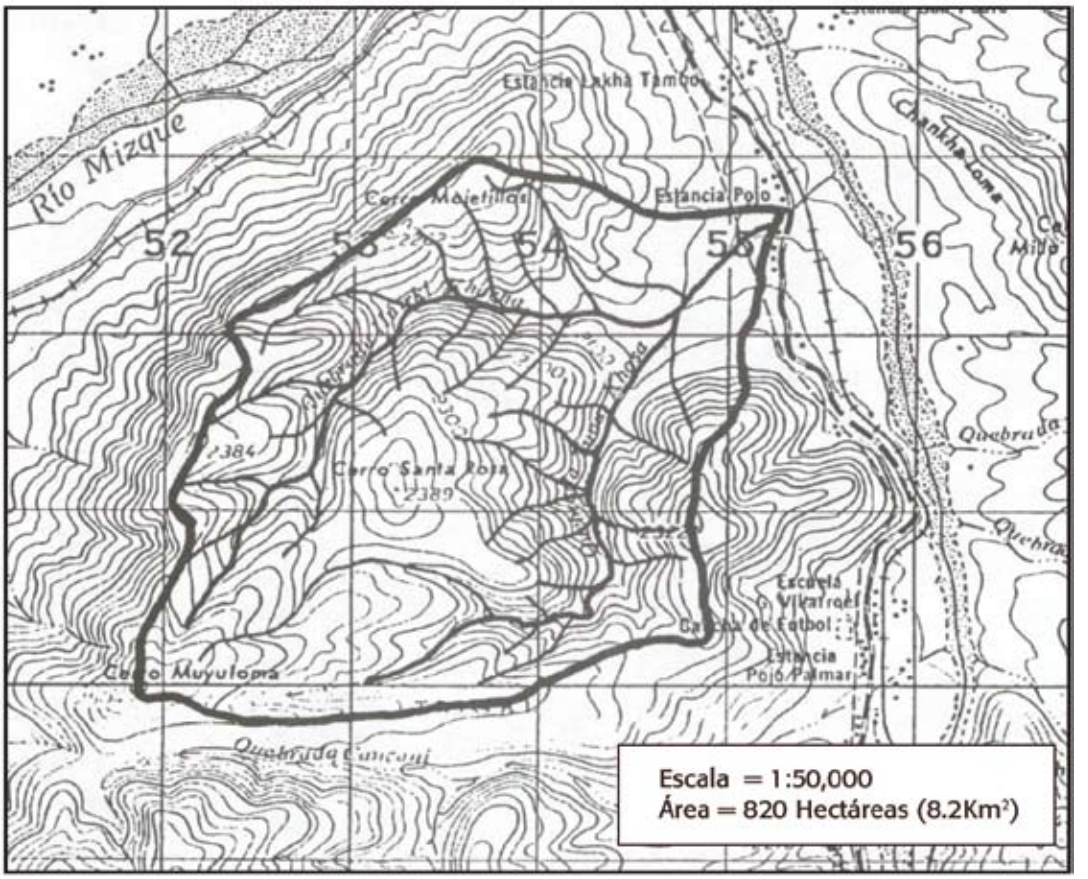
Las dimensiones de las estructuras de drenaje deberán estar basadas en un cierto caudal razonable de diseño, así como en las características del sitio y en consideraciones ambientales tales como zonas pesqueras (Foto 5.1). La determinación del caudal correcto de diseño o de un valor razonable es de importancia fundamental, para que la estructura pueda funcionar correctamente y para prevenir fallas en las estructuras. Un caudal razonable de diseño se basa comúnmente en una tormenta que tiene una frecuencia de recurrencia (periodo de retorno) de 20 a 100 años, dependiendo del tipo y valor de la estructura y de los reglamentos locales. Cualquier alcantarilla tiene una capacidad de flujo limitada que no debería excederse. Los puentes también tienen una capacidad específica para la sección transversal de diseño, pero es generalmente grande. El diseño de vados o cruces en estiaje se basa en estimaciones tanto de los caudales mínimos como de los máximos para ese drenaje en particular, pero son menos sensibles a las estimaciones del flujo.

La mayoría de los métodos de determinación del caudal implica la definición o estimación del área de drenaje. Este trabajo usualmente se realiza mediante la delineación del área de la cuenca de captación sobre un mapa topográfico (Figura 5.1). Idealmente, deberían usarse mapas topográficos a una escala de 1:10 000 o 1:20 000 para el diseño del proyecto de drenaje. Sin embargo, es frecuente que en muchos países la escala del mapa más detallado disponible sea de 1:50 000, por lo que este tipo de mapa debería emplearse.

Cuando menos debería usarse el llamado Método Racional, basado en la precipitación pluvial, para determinar la descarga de pequeñas cuencas de captación, con un área de drenaje de no más de aproximadamente 120 hectáreas. El Mé-

Foto 5.1 Determine un caudal máximo de diseño adecuado para un sitio particular, usando los métodos hidrológicos apropiados. Instale estructuras transversales de drenaje con base en este caudal de diseño y otras características del sitio.

Figura 5.1 Determine el área de drenaje de las cuencas de captación sobre un mapa topográfico, para ayudar a definir los caudales adecuados para el diseño de las obras de drenaje.



todo Talbot recurre directamente al Método Racional y puede resultar útil para hacer una estimación preliminar del diámetro de tubería necesario, en función del área de drenaje. Sin embargo, el Método Talbot no toma en consideración la intensidad variable de la lluvia ni el periodo de retorno, por lo que carece de precisión. En situaciones ideales se podrá contar con métodos estadísticos basados en análisis de regresión de datos regionales de flujo en arroyos o con datos reales de caudales en arroyos locales, y se podrá usar esta información.

En cuencas de captación extensas se puede contar con datos específicos de estaciones de aforo, los cuales se podrían analizar estadísticamente y usarse en el diseño hidráulico para determinar los caudales correspondientes a distintos periodos de retorno. Las marcas de niveles altos del agua y las mediciones de la geometría del cauce se pueden usar junto con la Fórmula de Manning (véase el Capítulo 6) para determinar la velocidad de flujo y por lo tanto el volumen de flujo (descarga, o capacidad) a través del cauce para un cierto nivel máximo del agua. Se puede recurrir a una gran variedad de métodos disponibles para el diseñador, a fin de determinar los caudales de diseño. Se debería usar cuando menos un método analítico e idealmente un par de métodos para comparar los resultados entre sí y ganar confianza en sus valores del caudal de diseño. Los métodos típicos de análisis para diferentes tamaños de cuencas de captación se muestran en la Tabla 5.1.

MÉTODO RACIONAL

Se usa con mucha frecuencia para la determinación de caudales en cuencas de captación pequeñas y se puede aplicar en las mayoría de las zonas geográficas. Resulta particularmente útil cuando no se tienen datos de flujo de arroyos locales y se puede usar para hacer una estimación aproximada del caudal para grandes cuencas de captación, a falta de otras opciones. Es por eso que la Fórmula Racional se presenta a continuación y se explicará brevemente. Mayor información detallada acerca de su uso se puede encontrar en referencias tales como *Minimum Impact Low-Volume Roads Manual* o en el *Manual FHWA HDS4 - Introduction to Highway Hydraulics*.

El Método Racional

Para determinar el volumen de flujo...

$$Q = \frac{CiA}{362}$$

donde:

Q = Caudal (Flujo), en metros cúbicos por segundo (m3/s).

C = Coeficiente de Escorrentía. Este coeficiente se selecciona de tal manera que refleje las características de la cuenca de captación, tales como topografía, tipo de suelo, vegetación y uso de suelo.

i= Intensidad promedio de lluvia para la frecuencia seleccionada y para una duración igual al Tiempo de Concentración (mm/hr).

A = Área de la cuenca de captación, en hectáreas.

Coeficiente de Escorrentía (C), su valores se presentan en la Tabla 5.2. En estos valores se reflejan las diferentes características de la cuenca de captación que afectan el escurrimiento. El diseñador debe desarrollar experiencia y usar su criterio para seleccionar el valor apropiado de C dentro del intervalo de variación mostrado. Puede observarse que el valor de C es posible que cambie en el curso de la vida útil de la estructura, como puede ser debido a cambios en el uso del suelo de un bosque para convertirse en terrenos agrícolas, o como resultado de un incendio en la cuenca de captación.

Área (A) es simplemente la superficie de la cuenca de captación que contribuye con escurrimientos hacia el cruce de drenaje. Sus límites abarcan desde uno de las líneas divisorias (parteaguas) de drenaje hasta el opuesto y hacia abajo hasta llegar al cruce. En la superficie de un camino, el "área de drenaje" es el talud del corte y el área de la superficie de la calzada entre drenes transversales o las cunetas de salida.

Intensidad de lluvia (i) es el tercer factor, y el que resulta más difícil de obtener. Se expresa como la intensidad promedio de lluvia en milímetros por hora (mm/h) para una cierta frecuencia de recurrencia y para una duración igual al Tiempo de Concentración de la cuenca de captación. Al inicio de una tormenta, el escurrimiento desde partes distantes de la cuenca de captación no ha llegado al punto de descarga. Una vez que el escurrimiento alcanza el punto de descarga, más allá del tiempo de concentración, tendrá lugar un régimen de flujo estable. Este periodo inicial constituye el "Tiempo de Concentración". Para el caso de cuencas de captación muy pequeñas, se recomienda un tiempo mínimo de concentración de 5 minutos para encontrar la intensidad que se usará en la determinación de los caudales de diseño. El tiempo de concentración se puede estimar dividiendo la distancia de la ruta de escurrimiento por la velocidad promedio de escurrimiento (usualmente 0.1 [plano, arbolado] a 1.0 m/s [inclinado, árido]).

En la Figura 5.2 se muestra una familia típica de curvas de intensidad-duración para una frecuencia de recurrencia de 2 a 50 años. Tales curvas, desarrolladas a partir de datos locales de precipitación pluvial, deberían localizarse o generarse cuando se trabaja en una zona en particular. Los valores típicos máximos de intensidad para un evento de 25 a 50 años en regiones desérticas es de entre 75 y 100 mm/h, aproximadamente; algunas regiones costeras y selváticas, o tropicales presentan intensidades máximas de entre 200 y 400 mm/h, o mayores; y la mayoría de las regiones, incluyendo las zonas semiáridas, los bosques de montaña, y las áreas costeras, poseen típicamente valores de entre 100 y 250 mm/h. Debido a la amplia gama de valores, y a la magnitud de la variación local que puede ocurrir alrededor de islas y de montañas, los datos locales son muy deseables para el trabajo de diseño del proyecto.

Prácticas Recomendadas

- Usar los mejores métodos hidrológicos disponibles para determinar los caudales de diseño.
- Donde resulte apropiado, usar estructuras de drenaje que no sean sensibles a las predicciones exactas de flujo, tales como cruces en estiaje (vados) y vados superficiales transitables, en comparación con tubos de alcantarilla.
- Agregar un bordo libre o capacidad adicional a estructuras en drenajes con caudales inciertos o en cuencas de captación que tengan usos cambiantes del suelo, generalmente del orden de 120 a 150%.
- Para minimizar riesgos a estructuras, la frecuencia recomendada de tormentas (periodo de retorno) para el diseño de alcantarillas es de 20 a 50 años, y se recomienda de 100 a 200 años para puentes o drenajes con problemas ambientales críticos.
- Para alcantarillas instaladas en zonas con datos hidrológicos limitados o con diseños inadecuados, incluir protección por derrames (desbordamiento) para reducir el riesgo de falla total o el desvío de arroyos (véase la Figura 7.11).
- Hacer participar a hidrólogos, biólogos de pesquerías e ingenieros en el proceso de diseño hidrológico e hidráulico

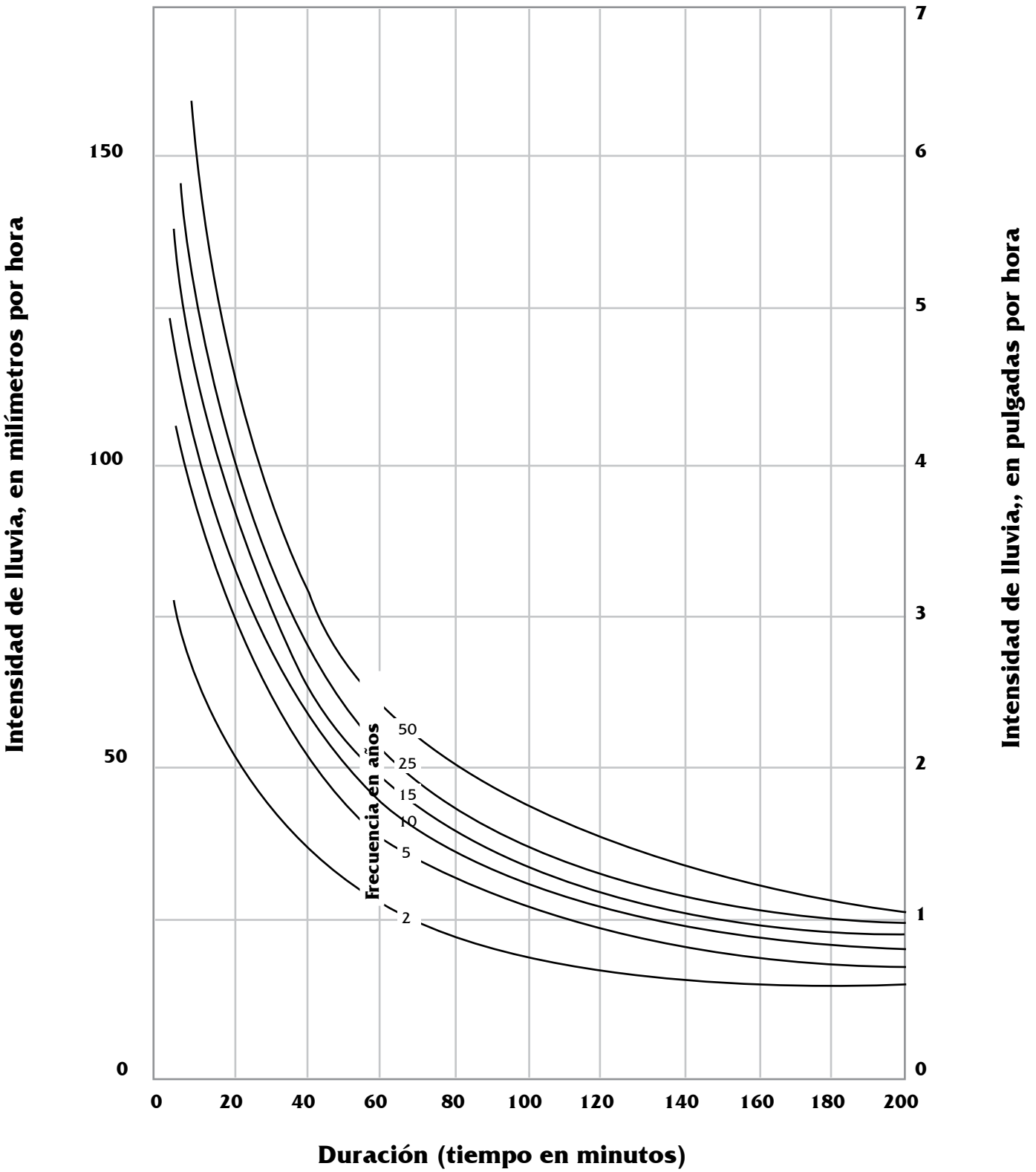
Tabla 5.1

Métodos de Análisis para Diferentes Tamaños de Cuencas de Captación	
Área de la Cuenca	**Análisis Típico**
Pequeña (hasta 120 ha ó 300 acres)	Método Racional, Método de Talbot, Experiencia Local
Mediana (hasta 4,000 ha ó 10,000 acres)	Analisis de Regresión, Marcas de Niveles Altos de Agua-Fórmula de Manning, Experiencia Local
Grande (más de 4,000 ha)	Datos de Aforos en la Estación Hidrométrica, Marca de Niveles Altos de Agua, Análisis Estadísticos.

Tabla 5.2

Método Racional Valores de "C" (Coeficiente de Escorrentía)	
Uso o tipo de suelo	**Valor de "C"**
AGRICULTURA	
Suelo desnudo	0,20-0,60
Campos cultivados (suelo arenoso)	0,20-0,40
Campos cultivados (suelo arcilloso)	0,30-0,50
PASTO	
Praderas de césped	0,10-0,40
Áreas escarpadas con pastos	0,50-0,70
REGIONES ARBOLADAS / BOSQUES	
Zonas arboladas con terreno a nivel	0,05-0,25
Zonas boscosas con laderas empinadas	0,15-0,40
Zonas desnudas, abruptas y rocosas	0,50-0,90
CAMINOS	
Pavimento asfáltico	0,80-0,90
Pavimento de cantos rodados o concreto	0,60-0,85
Superficie de grava	0,40-0,80
Superficie con suelo nativo	0,30-0,80
ZONAS URBANAS	
Residenciales, planas	0,40-0,55
Residenciales, moderadamente empinadas	0,50-0,65
Comerciales o céntricas	0,70-0,95

Figura 5.2 Curvas típicas de frecuencia de Intensidad - Duración de la precipitación pluvial (Adaptado de FHWA Hydraulic Design Series No. 4, 1997).



<u>Nota:</u> Valores comunes de intensidad máxima para una frecuencia de eventos de 25-50 años:

- Zonas selváticas: 200-400 mm/hr
- Desiertos: 50-100 mm/hr
- La mayor parte de las zonas (Semiáridos, Montañosas y Costeras): 100-250 mm/hr

Prácticas Que Deben Evitarse

- Instalación de estructuras de drenaje sin haber hecho algún tipo de evaluación racional o estadística del caudal.

Un cruce de drenaje puede ser un punto crítico y vulnerable en el camino si la estructura de drenaje falla. Por ello, los cruces de drenaje deben ser diseñados para que pase el caudal de la tormenta apropiada, más los escombros, o para sobrevivir un desbordamiento.

Capítulo 6

Herramientas para Diseño Hidráulico y de Caminos

"¡Proteja contra la socavación! Incorpore enrocamiento de protección de tamaño adecuado y filtros en las medidas de protección de márgenes de arroyos."

El diseño hiráulico comprende varios conceptos básicos que se deben tomar en cuenta para construir proyectos exitosos con un mínimo riesgo de falla (Foto 6.1). La aplicación de la **Fórmula de Manning** para determinar la capacidad y velocidad del flujo, la colocación de **Enrocamiento (o Zampeado)** para la protección de las márgenes de un arroyo y contra la socavación, y de **Zonas de Filtros** para evitar tubificación y socavación, combinado con el empleo de grava o de **Geotextiles**, son todas y cada una de ellas importantes consideraciones de diseño en el caso de estructuras hidráulicas y de caminos. Para el diseño básico de drenaje para caminos, con frecuencia se recurre a la Fórmula de Manning para la determinación de las velocidades de flujo en cauces naturales, para determinar el volumen de ese escurrimiento (como alternativa al método comentado en el Capítulo 5) y para la determinación de la capacidad de flujo de canales y cunetas. El uso de la Fórmula de Manning para determinar las velocidades de la corriente y el caudal está bien documentada en muchos manuales de ingeniería y de hidráulica, por lo que los ingenieros de caminos que estén realizando diseños básicos hidráulicos deberían familiarizarse con ese método y con sus aplicaciones. Los canales complejos con flujos inestables o críticos, que varían rápidamente, deben evaluarse con la participación de un ingeniero hidráulico especializado.

FÓRMULA DE MANNING

El caudal que fluye por un canal (Q) es igual al producto de la velocidad promedio del flujo por el cauce (V) por el área (A) de la sección transversal del canal. Para determinar la descarga (Q) en drenajes naturales, canales y tubos trabajando sin presión, se aplica la siguiente ecuación:

Foto 6.1 Socavación de un suelo fino detrás del estribo de un puente, causada por una protección insuficiente de las márgenes del arroyo durante una tormenta.

Caudal = (Velocidad) x (Área)

o

$Q = VA$

donde:

Q = caudal, en metros cúbicos por segundo (m^3/s)
V = velocidad promedio del flujo, en metros por segundo (m/s)
A = área de la sección transversal, en metros cuadrados (m^2).

La fórmula de Manning se puede usar para calcular la velocidad promedio del flujo (V) en cualquier canal o arroyo natural con flujo uniforme, como se muestra a la derecha. La fórmula de Manning se puede resolver fácilmente para un canal dado cuando se usa el caudal conocido o supuesto. Sin embargo, para determinar el caudal que producirá una cierta descarga dentro de un canal, hace falta una solución por aproximaciones sucesivas. Mayor información detallada sobre el uso de la Fórmula de Manning se presenta en la literatura, como es el caso del *Minimum Impact Low-Volume Roads Manual, del manual FHWA HDS4-Introduction to Highway Hydraulics, o el texto Open-Channel Hydraulics, de V.T. Chow.*

USO DE ENROCAMIENTO DE PROTECCIÓN (ZAMPEADO)

Las altas velocidades del flujo en canales o a lo largo de las márgenes de arroyos locales con frecuencia producen erosión, socavación o la formación de quebrada en las márgenes. La socavación puede erosionar la base de puentes y alcantarillas y producir la falla de estas estructuras. Generalmente se usa enrocamiento o grandes piedras para proteger las márgenes del arroyo y las estructuras contra la socavación (Foto 6.2). Se puede

Fórmula de Manning

Para calcular la velocidad promedio del flujo...

$$V = \frac{1}{n} (R^{2/3}) (S^{1/2})$$

donde:

V = velocidad promedio del flujo (metros/segundo)

n = coeficiente de rugosidad (usualmente entre 0,04 - 0,07 para canales naturales); véanse las tablas en el manual para valores específicos de n.

S = pendiente del canal (metros/metro)

R = radio hidráulico (metros) = A/P

donde **A** y **P** son:

A = área de la sección transversal del canal

P = perímetro mojado.

Coeficiente de Rugosidad (n) varía considerablemente dependiendo de las características de un canal o con la tersura de un canal, tubo, etc. Los valores "n" de Manning para diversos canales naturales y artificiales se encuentran en muchos manuales y guías de hidráulica. Los canales abiertos lisos con fondo de gravas tienen valores comprendidos entre 0,035 y 0,055. Los canales muy tortuosos con vegetación, o los canales muy rocosos presentan valores de entre 0,055 y 0,075. Los canales lisos de tierra o de roca tienen valores de 0,020 a 0,035. Los valores de rugosidad generalmente se incrementan a medida que aumenta la vegetación y los escombros dentro del canal, conforme aumenta lo sinuoso de su trayectoria, y en la medida que aumenta el tamaño promedio de los materiales del canal. El valor disminuye ligeramente conforme aumenta el caudal de agua.

Pendiente (S) del cauce o del canal de drenaje se determina para el tramo local del canal que se va a analizar, al dividir la elevación, o altura en ese tramo entre la longitud de dicho tramo. Esta pendiente se mide generalmente dentro del cauce propiamente dicho, aguas arriba y aguas abajo del sitio, e idealmente también se verifica en un plano topográfico.

Radio Hidráulico (R) se determina a partir del área de la sección transversal (**A**) dividida entre el perímetro mojado (**P**). El perímetro mojado (**P**) es simplemente la distancia a lo largo del fondo del canal y/o de los lados que permanece bajo el agua, o dentro del área (**A**) del flujo. El área debe obtenerse de una o varias secciones representativas del canal de flujo.

Foto 6.2 Enrocamiento usado para la protección de márgenes del arroyo contra la socavación a la entrada de una estructura. Observe el empleo de sauces para aumentar la resistencia "biotécnica" derivada de las raíces.

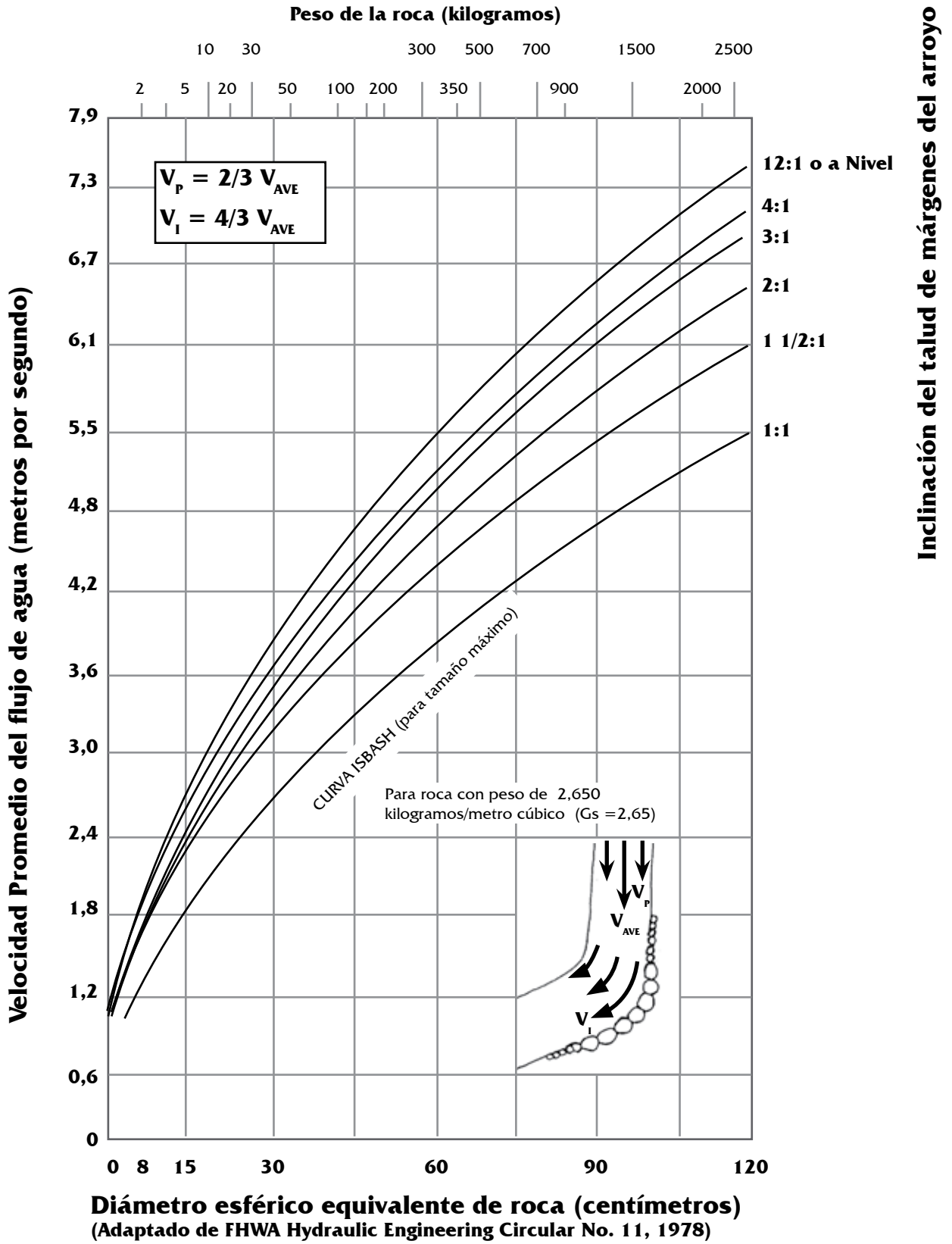
usar roca junto con vegetación o con otras medidas tales como tocones, gaviones o dentellones para proporcionar protección a las márgenes (Foto 6.3). El tamaño de la roca (enrocamiento o zampeado), así como la aplicación de otras medidas, comúnmente se determina en función de la velocidad del flujo y de las condiciones locales del cauce.

Las velocidades promedio en el cauce del arroyo ($\mathbf{V_{AVE}}$) se pueden determinar mediante la Fórmula de Manning. Por otro lado, las velocidades del flujo se pueden determinar en el campo siempre y cuando se pueda medir el flujo superficial durante la ocurrencia de tormentas. Ésta es la distancia que un objeto, como puede ser un tronco o una vara, recorre en la parte media del arroyo dividido por un cierto intervalo corto de tiempo. La velocidad promedio del flujo será del orden de 0,8 veces, o de 80% del valor de la velocidad superficial. Las velocidades máximas promedio más comunes en arroyos y ríos oscilan entre 1,5 y 3 m/s para terreno plano y entre 2 y 4 m/s en cauces montañosos abruptos. En los canales más tendidos se podrán encontrar de hecho velocidades más rápidas del flujo que en los canales más empinados debido a sus características típicas de menor rugosidad.

En la Figura 6.1 se presenta una correlación útil entre la velocidad del agua (Velocidad Promedio del Flujo) y el tamaño del enrocamiento de protección (Diámetro) necesario para proteger las márgenes del arroyo sin ser arrastrado. El flujo a lo largo de una sección tangente larga del arroyo, o el flujo paralelo ($\mathbf{V_P}$) al arroyo se supone que son iguales a las dos terceras partes o al 67% de la velocidad promedio ($\mathbf{V_{AVE}}$). El flujo en una sección curva del arroyo, con un flujo que choca, tiene una velocidad incidente supuesta ($\mathbf{V_I}$) igual a las cuatro terceras partes o 1,33% de la velocidad promedio ($\mathbf{V_{AVE}}$). Por lo tanto, el enrocamiento de protección en un área con flujo relativamente rápido, tal como en un meandro de un canal, soportará

Foto 6.3 Un fajo de raíces, troncos y márgenes del arroyo protegidas con enrocamiento, se usan como protección contra la socavación. Los troncos y vegetación pueden brindar una alternativa atractiva al enrocamiento en zonas del arroyo con velocidades relativamente bajas.

Figura 6.1 Tamaño de los fragmentos de roca, para resistir el desplazamiento bajo diversas velocidades del flujo de agua y de la pendiente de los taludes.



(Adaptado de FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 11, 1978)

Nota: El enrocamiento deberá ser de una mezcla bien graduada de roca, pero la mayor parte de los fragmentos deberán ser mayores que el tamaño indicado en las curvas. El enrocamiento se deberá colocar en una sola capa de 1,5 veces (o más) el espesor del diámetro de la piedra más grande usada y se depositará sobre una capa de filtro de geotextil o de apoyo de grava bien graduada.

mayores esfuerzos y necesitará fragmentos más grandes de roca que los del tamaño necesario en un tramo recto del canal.

Se puede observar que la mayor parte de los fragmentos de roca deberá ser tan grande o más que el tamaño indicado en la Figura 6.1. La Curva Isbash indica el tamaño máximo de roca que se podría considerar en una aplicación crítica. Si no se dispone de roca grande adecuada entonces se podrá recurrir a roca inyectada con cemento, mampostería o gaviones.

En la Tabla 6.1 se presentan granulometrías comunes, tamaños y pesos de diferentes tipos de enrocamiento de protección. Los detalles para la colocación del enrocamiento de protección se muestran en la Figura 6.2, así como en la nota dentro de la Figura 6.1. Idealmente el enrocamiento de protección debería colocarse sobre una cimentación estable y encima de una capa de filtro constituida ya sea por arena gruesa, grava o un geotextil. El enrocamiento en sí deberá estar graduado para tener una gama de tamaños que permita minimizar los huecos y formar una capa compacta. El enrocamiento debería colocarse en una capa con un espesor que sea cuando menos igual a 1,5 veces el tamaño (diámetro) de la roca de mayor tamaño especificado, estando la zona más gruesa en la base de la roca. En el cauce de un arroyo, la capa de enrocamiento de protección deberá cubrir completamente los lados mojados del canal, con un cierto bordo libre, y deberá colocarse hasta una profundidad igual o mayor que la profundidad de la socavación esperada.

Foto 6.4 Uso de geotextiles colocados encima de suelos finos para proporcionar una filtración adecuada a un subdrén geocompósito.

FILTROS

Un filtro funciona como una capa de transición de grava pequeña o un geotextil colocado entre una estructura, como puede ser el enrocamiento de protección, y el suelo subyacente. Su finalidad es: 1) evitar el movimiento del suelo detrás del enrocamiento de protección o de los gaviones, o hacia el subdrenaje; y 2) permitir que el agua subterránea drene del suelo sin que se generen presiones de poro. Con los criterios específicos para filtros, documentados en otras referencias, se establecerá el tamaño de partículas y las relaciones granulométricas necesarias entre el suelo fino local, un material de filtro y roca gruesa como puede ser la roca drenante o el enrocamiento de protección. Existen además requisitos específicos para geotextiles usados como filtros.

De manera tradicional, se ha usado arena gruesa o grava bien graduada con drenaje libre como material de filtro. Una capa de filtro de arena o de grava tiene comúnmente entre 15 y 30 cm de espesor. En algunas aplicaciones entre suelo fino y fragmentos grandes de roca, se podrán necesitar dos capas de filtro. En la actualidad los geotextiles son de uso común para proporcionar zonas de filtro entre materiales de diferentes tamaños y granulometrías debido a que resultan económicos, son fáciles de instalar, y se comportan bien dentro de una amplia variedad de suelos (Foto 6.4). En la Figura 6.2 se muestra la aplicación de una grava o de un geotextil como filtro entre el suelo de la margen de un arroyo y la capa de enrocamiento de protección.

USO DE GEOTEXTILES

Los geotextiles tejidos o no tejidos punzados con aguja se usan generalmente para lograr un filtro entre la roca y el suelo, con lo cual se evita la socavación y el movimiento del suelo. Son relativamente fáciles de instalar bajo la mayoría de las condiciones. La

Tabla 6.1

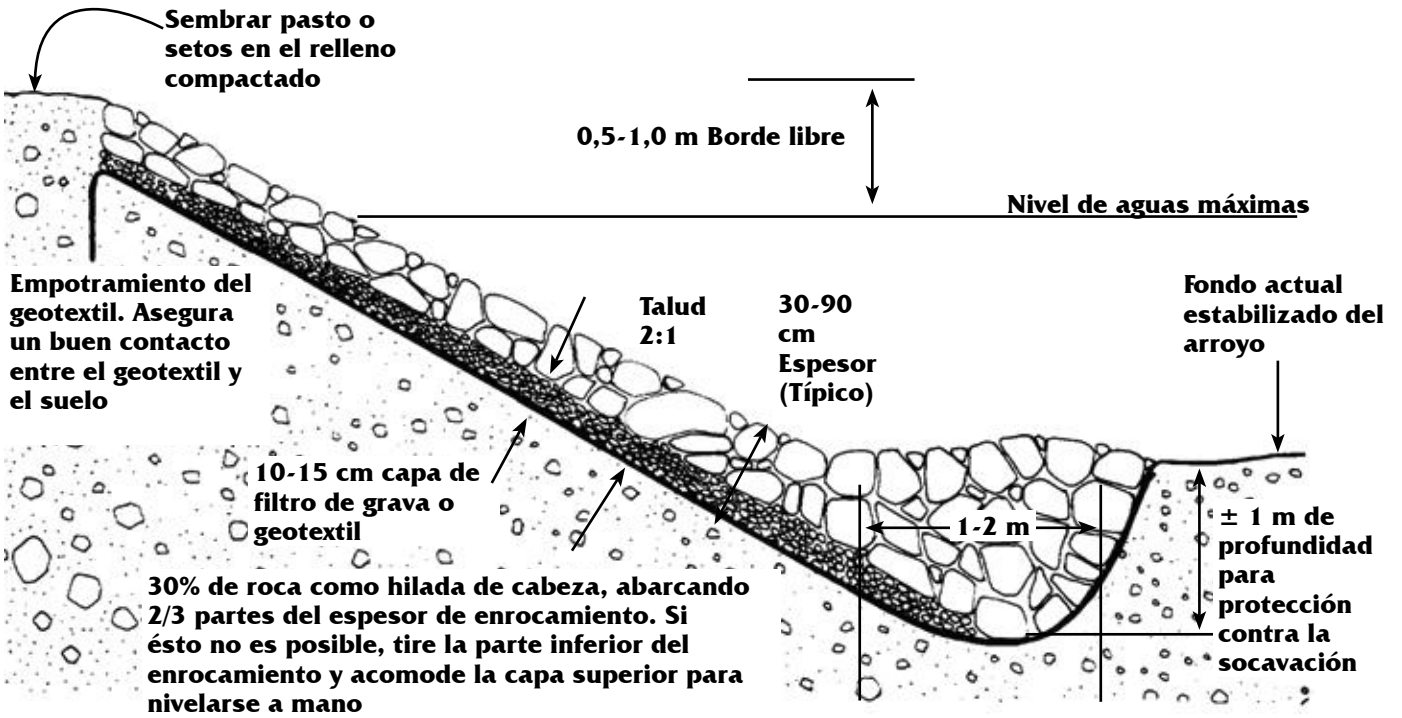
Clasificación y Granulometría del Enrocamiento de Protección (en peso y tamaño de los fragmentos de roca)			
Categoría	**Peso** Kilogramos (libras)	**Tamaño de la roca*** Centímetros	**Porcentaje que pasa** (Porcentaje de roca menor que el tamaño indicado)
Clase I	5 (11)	15	100
	2,5 (5)	12	80
	0,5 (1)	7	50
	0,1 (0,2)	3	10 máximo
Clase II	25 (55)	25	100
	15 (35)	20	80
	5 (11)	15	50
	0,5 (1)	8	10 máximo
Clase III	50 (100)	30	100
	30 (60)	25	80
	10 (25)	20	50
	1 (2)	10	10 máximo
Clase V	100 (220)	45	100
	70 (150)	35	70
	35 (75)	25	30
	7 (15)	15	10 máximo
Clase VII	300 (650)	60	100
	200 (440)	50	70
	100 (220)	40	30
	10 (22)	20	10 máximo
Clase VIII	1 000 (2 200)	90	100
	600 (1 320)	70	70
	200 (440)	50	30
	30 (65)	25	10 máximo
Clase X	2 000 (4 400)	120	100
	1 000 (2 200)	90	80
	300 (660)	60	50
	40 (90)	30	10 máximo

Fuente: Adaptado de USDA-Forest Service. *diámetro esférico equivalente

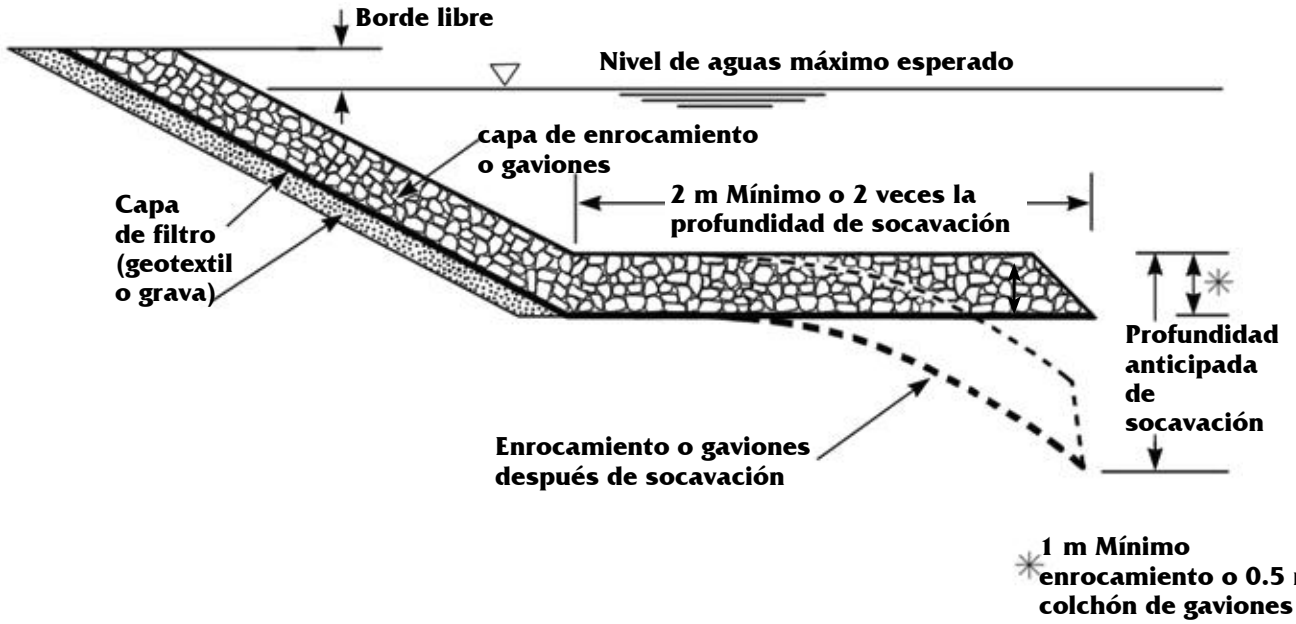
tela debe estirarse bien a través del area del suelo que se va a proteger antes de proceder a colocar el enrocamiento (Foto 6.5). Se puede usar un geotextil tejido de un solo filamento o uno del tipo no tejido y punzado con aguja, y además debe ser permeable. Es necesario que el geotextil tenga un Tamaño Aparente de Abertura de entre 0,25 y 0,5 mm. A falta de mayor información, se usa comúnmente un geotextil no tejido punzado con aguja con peso de 200 g/m2 (6,0 oz/yd2) para muchas aplicaciones de filtración y separación de suelos.

Entre otras aplicaciones comunes de geotextiles o de materiales geosintéticos (como geomallas) para caminos, se incluye el refuerzo de la subrasante a fin de reducir el espesor de la capa de agregado necesaria, colocada sobre suelos muy débiles; la separación del agregado de los suelos blandos de la subrasante; el refuerzo de suelos en estructuras como pueden ser muros de retención y rellenos reforzados; y la recolección de sedimentos mediante barreras contra azolves (Foto 6.6), como se ilustra en la Figura 6.3. Si no se cuenta con ingenieros experimentados, entonces deberá consultarse con los distribuidores o fabricantes de geotextiles en lo que se refiere a la función y a los tipos adecuados de geotextil para usarse en diversas aplicaciones de ingeniería.

Figura 6.2 Dos ejemplos de protección típica de márgenes o riberas de arroyos mediante enrocamiento.



a. Detalle del pie de roca y de la capa de filtro.

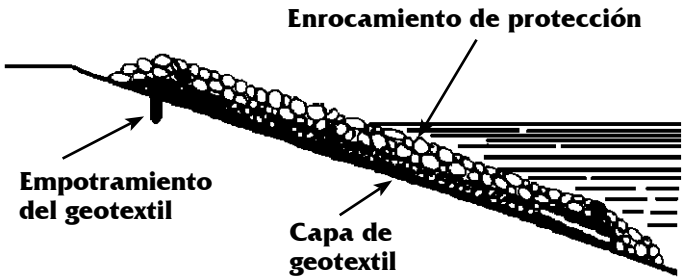


b. Detalles de la capa de enrocamiento o de gaviones colocado en el fondo del cauce del arroyo.

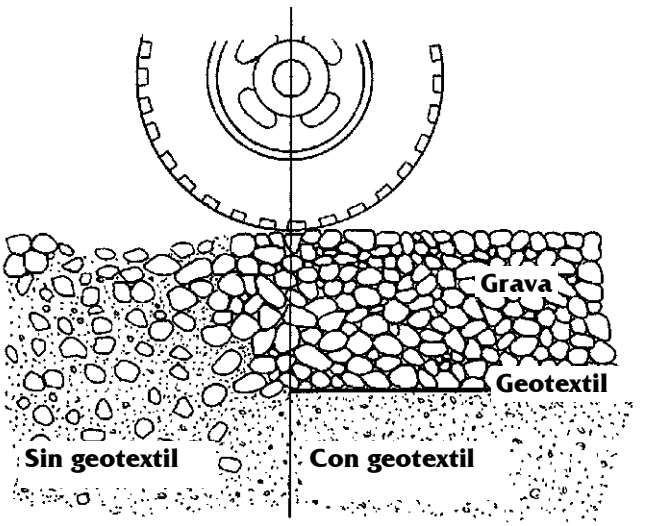
Foto 6.5 Tela de filtro (geotextil) como respaldo de un contrafuerte de talud, hecho con roca suelta que se usa para proporcionar filtración, permitir la infiltración y evitar el desplazamiento del suelo fino hacia la roca (Foto de Richard Van Dyke).

Foto 6.6 Uso de geotextiles como "barreras contra azolves" para atrapar sedimentos de una zona en construcción.

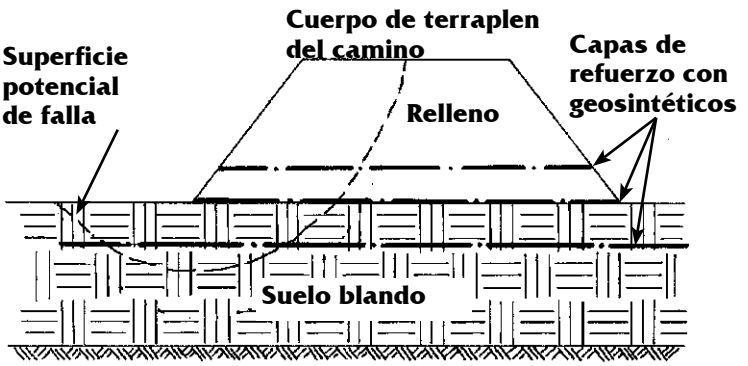
Figura 6.3 Aplicaciones típicas de geotextiles para caminos rurales (Adaptado con permiso de AMOCO Fibers Corporation).



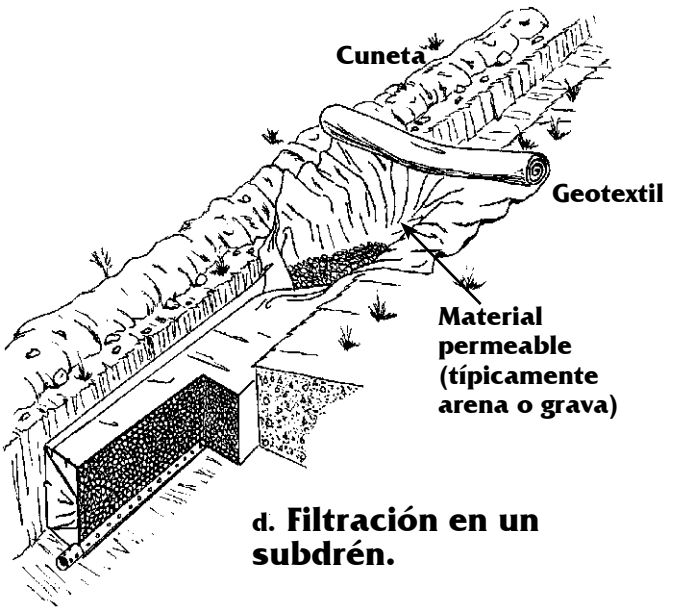
a. Filtro bajo el enrocamiento para protección de las márgenes del arroyo.



b. Separación de la subrasante y refuerzo.

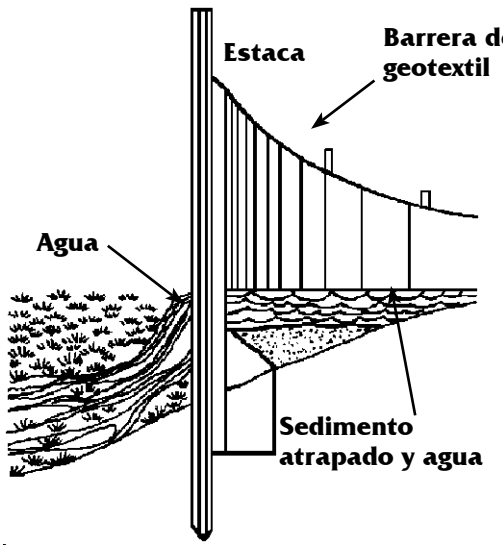


c. Refuerzo del terraplén sobre depósitos de suelo blando.



d. Filtración en un subdrén.

e. Estructuras de contención a base de suelo reforzado.



f. Barrera contra azolves para atrapar sedimentos.

Prácticas Recomendadas

- Determinar las velocidades en el cauce del arroyo para analizar el potencial de socavación, las necesidades de protección de las estructuras y los impactos sobre la vida acuática.
- Usar enrocamiento bien graduado, duro, angular, y con los tamaños adecuados donde se necesite protección contra la socavación. El tamaño de roca necesario (y el peso) en función de la velocidad promedio del flujo de agua se muestra en la Figura 6.1. Si se tienen meandros o curvas, aumente el tamaño de los fragmentos de roca entre 30 y 50 por ciento con respecto al mostrado en la Figura 6.1 para el caso de velocidades promedio de flujo.
- Usar arena limpia, grava limpia bien graduada con tamaños de 0,5 a 1 cm, o un geotextil como filtro entre suelos finos erosionables y una roca permeable gruesa o enrocamiento de protección (véase en la Figura 6.2 la instalación típica de un enrocamiento de protección con un respaldo de filtro).
- Usar medidas contra la socavación para proteger a las estructuras, para evitar la falla de las mismas, y para evitar impactos adversos a los arroyos. Es común el empleo de enrocamiento de protección en zonas de alta velocidad o en áreas críticas (Foto 6.7). También se puede usar vegetación, tocones, troncos o espolones para la estabilización de las márgenes de un arroyo.
- Poner atención a los detalles de diseño donde sea necesario colocar protección de roca y filtros.
- Usar geotextiles en aplicaciones para caminos y para obras hidráulicas a fin de proporcionar un filtro por detrás del enrocamiento de protección o alrededor de un subdrén. Use materiales geosintéticos en otras aplicaciones, tales como separación y refuerzo, en aquellos casos en los que sean costo-efectivos y prácticos.

Foto 6.7 Un enrocamiento de protección con respaldo de un filtro de geotextil están siendo usados para proteger al camino de grandes flujos de agua. Observe que el camino está mal ubicado, muy cerca del arroyo.

Prácticas Que Deben Evitarse

- Instalación de estructuras sin tomar debidamente en cuenta las velocidades esperadas del flujo y los tamaños adecuados de los fragmentos de roca, para protección de las márgenes.
- Instalación de medidas para drenaje subterráneo, tales como subdrenes, sin protección con filtros (como puede ser el empleo de geotextiles y de materiales de filtro con arena o grava del tamaño adecuado).

Capítulo 7

Drenaje para Caminos Rurales

"Tres de los aspectos más importantes en el diseño de caminos: drenaje, drenaje y drenaje"

La ubicación del camino y el drenaje de caminos, así como las zonas de construcción y otras áreas de actividad, constituyen los factores más importantes que pueden afectar la calidad del agua, la erosión y los costos de los caminos. Como parte del drenaje se incluye el control del agua superficial y el desalojo adecuado del agua bajo los caminos en los cauces naturales. Entre los aspectos relacionados con el drenaje que deben tomarse en cuenta para el diseño y construcción de caminos se incluyen los siguientes: drenaje superficial de la calzada; control del agua en cunetas y a las entradas y salidas de tuberías; cruces de cauces naturales y de arroyos; cruces en humedales; subdrenaje; y selección y diseño de alcantarillas (Capítulo 8), cruces en estiaje (Capítulo 9), y puentes (Capítulo 10). Tres de los más importantes aspectos del diseño de caminos son los siguientes: **¡drenaje, drenaje y drenaje!**

El diseño adecuado del drenaje de caminos requiere una cuidadosa **atención al detalle**. Las condiciones y los patrones de drenaje se deberán estudiar en el sitio. El funcionamiento del drenaje se debería observar durante los periodos de lluvia para observar la forma en que se desplaza realmente el agua, en dónde se concentra, qué daños puede causar, y que medidas se necesitan para evitar daños y para mantener a los sistemas de drenaje funcionando adecuadamente.

CONTROL DEL DRENAJE SUPERFICIAL DE CAMINOS

La superficie del camino necesita configurarse de tal forma que el agua se disperse y se desplace fuera del camino lo más rápido y frecuente que sea posible (Foto 7.1). El agua estancada en los baches, roderas y ondulaciones debilitará la capa de subrasante y acelerará los daños. El agua concentrada en las roderas o estancada en la superficie de rodadura a lo largo de tramos largos puede lle-

Foto 7.1 Diseñe los caminos para que eliminen el agua rápidamente de la superficie de rodadura y minimicen las concentraciones de agua, mediante el uso de peralte hacia afuera, hacia adentro o coronamientos y agregue pendientes ondulantes.

gar a acelerar la erosión. Las pendientes fuertes del camino hacen que el agua superficial y el de las cunetas se desplace rápidamente y que se dificulte controlar el drenaje superficial. Esta condición acelera la erosión a menos que las superficies se protejan o que el agua se disperse o se elimine frecuentemente.

El agua superficial de la calzada debe controlarse mediante medidas de drenaje positivas usando secciones con **peralte hacia afuera, peralte hacia adentro**, o en **corona** del camino, según se muestra en la Figura 7.1. Los caminos con **peralte hacia afuera** permiten dispersar mejor el agua, minimiza el ancho del camino, aunque tal vez necesiten superficie de rodadura y estabilización del relleno en talud. Con un camino con pendiente transversal hacia fuera se minimiza la concentración de agua, se minimiza el ancho necesario del camino, se evita la necesidad de una cuneta interior, y se minimizan los costos. Los caminos con peralte hacia fuera que tengan materiales de cobertura con abundante arcilla y por tanto resbaladizos, con frecuencia necesitan que la superficie se estabilice con roca o que se limite su uso durante la temporada de lluvias para garantizar la seguridad del tránsito. En caminos con pendiente de más de 10 a 12% así como en zonas de laderas con fuerte inclinación, los caminos resultan difíciles de drenar y pueden "sentirse inseguros".

Con los caminos dotados de **peralte hacia adentro** se puede controlar mejor el escurrimiento superficial del camino pero el agua se concentra y por lo tanto se requiere un sistema de cunetas, drenes transversales y un ancho adicional del camino para alojar la cuneta. Los vados ondulantes superficiales de base ancha o alcantarillas de tubo, deben estar colocados a intervalos frecuentes a fin de eliminar toda el agua superficial esperada sobre el camino antes de que se presente la erosión (Véase la Tabla 7.1). Estas distancias máximas recomendadas deberían usarse como guía para la ubicación de los drenes transversales y de las estructuras de cunetas de alivio. Se deberán

Figura 7.1 Opciones típicas para drenaje de la superficie del camino.

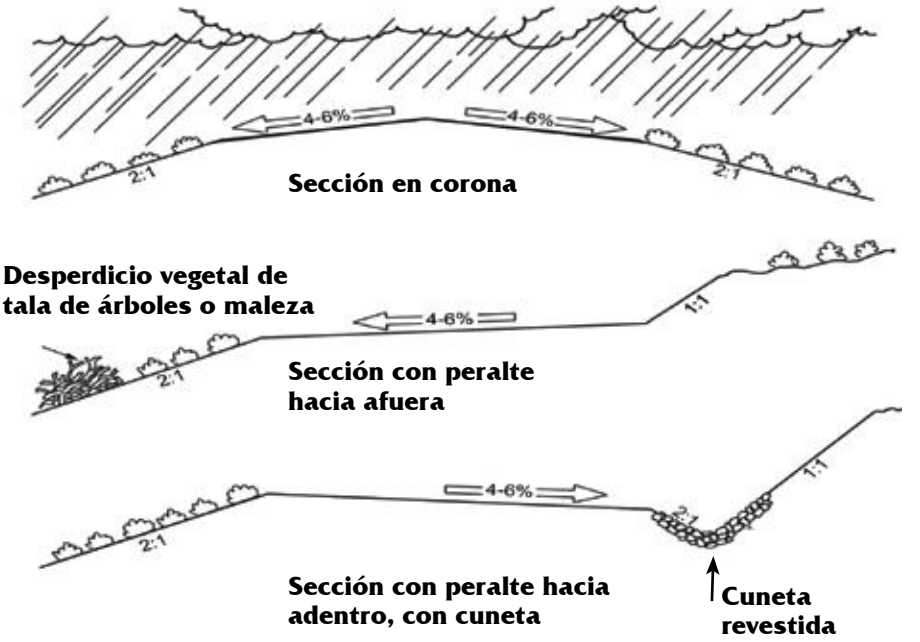


Foto 7.2 Use un vado ondulante superficial como dren transversal, para desalojar el agua fuera de la superficie del camino de manera eficiente y económica, sin tener que usar tubos de alcantarilla.

determinar las ubicaciones específicas en el campo tomando como base los patrones reales de flujo del agua, la intensidad de la lluvia, las características de erosión de la superficie del camino, y las zonas disponibles para descarga resistentes a la erosión.

Las **secciones en corona** resultan adecuadas para caminos de dos carriles de más exigentes especificaciones con pendientes suaves. También requieren de un sistema de cunetas interiores y de drenes transversales. Resulta difícil crear y mantener una corona sobre un camino angosto, por lo que generalmente el drenaje con pendiente transversal hacia adentro o hacia afuera resulta más efectivo.

Los **drenes transversales de alcantarilla** se usan para desplazar el agua de las cunetas a través del camino. Constituyen el tipo más común de drenaje superficial de caminos y resultan los más adecuados para el caso de caminos de altas velocidades en los que se desea un perfil suave de la superficie del camino. Sin embargo, los tubos son costosos y las tuberías de relativo poco diámetro de las alcantarillas necesitan limpieza y son susceptibles al taponamiento.

Los **vados ondulantes superficiales (o vados de base ancha)** están diseñados para dejar pasar tránsito lento al mismo tiempo que dispersan el agua superficial (Foto 7.2). Los vados superficiales generalmente cuestan menos, implican menos mantenimiento y son menos propensos a taparse y a fallar que los tubos de alcantarilla. Los vados superficiales son ideales para caminos rurales y para velocidades de bajas a moderadas (20-50 kph). La separación es función de la pendiente del camino y del tipo de suelo, como se aprecia en la Tabla 7.1. Entre otros tipos de estructuras transversales a la superficie del camino que se usan ocasionalmente se incluyen canalones abiertos de madera o metal, y deflectores de hule para agua.

Las pendientes fuertes de caminos no son recomendables y resultan problemáticas, pero ocasionalmente son necesarias. En pendientes de hasta 10% se facilita el uso de drenes transversales con alcantarillas o vados superficiales ondulantes. Si está entre 10 y 15%, funcionan los drenes transversales de alcantarillas frecuentemente espaciadas en combinación con cunetas revestidas. Con inclinaciones de más de 15%, resulta difícil hacer más lento el flujo de agua o eliminarla rápidamente de la superficie del camino. En este caso resulta mejor usar alcantarillas de drenaje transversal muy cercana entre sí junto con cunetas

Tabla 7.1

Distancias máximas recomendadas entre vados ondulantes superficiales o drenes transversales de alcantarilla (metros)		
Pendiente del camino %	**Suelos de baja a nula erosionabilidad [1]**	**Suelos erosionables [2]**
0-3	120	75
4-6	90	50
7-9	75	40
10-12	60	35
12+	50	30

Tabla 7.2

Separación recomendada entre caballones desviadores (metros)		
Pendiente del camino %	**Suelos de baja a nula erosionabilidad [1]**	**Suelos erosionables [2]**
0-5	75	40
6-10	60	30
11-15	45	20
16-20	35	15
21-30	30	12
30+	15	10

Nota: [1] Suelos de baja erosionabilidad = Suelos rocosos gruesos, grava y ciertas arcillas
[2] Suelos altamente erosionables = Suelos finos desmenuzables, limos, arenas finas. Adaptado de Packer and Christensen (1964) y de Copstead, Johansen, y Moll (1998).

Prácticas Recomendadas

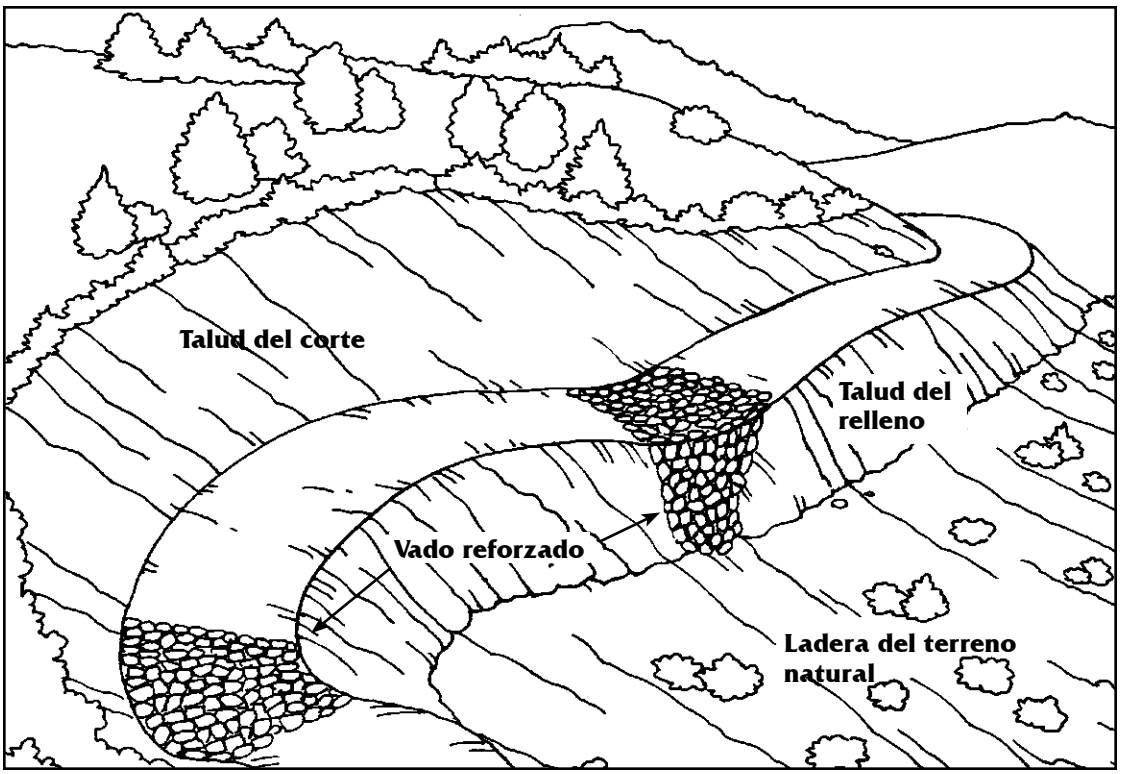
Control del drenaje superficial del camino

- Diseñar y construir los caminos de tal manera que puedan desalojar el agua rápidamente fuera de la superficie de rodadura, a fin de mantener drenada la superficie sin poner en riesgo su integridad.
- Evitar caminos con pendientes muy pronunciadas que sobrepasen de entre 12 y 18%. Resulta muy difícil y costoso controlar debidamente el drenaje en pendiente muy inclinadas.
- Mantener un drenaje superficial positivo mediante una sección con peralte hacia fuera, hacia adentro o en coronamiento usando pendientes de 3 a 5% de inclinación (Figura 7.1).
- Hacer que las pendientes sean ondulantes o forme ondulaciones frecuentemente en el perfil del camino para dispersar el agua, sobre todo hacia adentro o hacia afuera de cruces de arroyos (Figura 7.2a) (véase la Foto 7.1).
- Usar con frecuencia cunetas de desvío (Figura 7.2b y Figura 7.8) para evitar la acumulación de agua en exceso en las cunetas de la calzada.
- Usar estructuras de drenaje transversal al camino (ya vados superficiales, alcantarillas de tubo, o alcantarillas abiertas (canalones)) para desalojar el agua a través del camino desde la cuneta interior hasta el talud por debajo del camino. Colocar las estructuras de drenaje transversal muy cercanas entre sí como para eliminar toda el agua superficial. En la Tabla 7.1 se proporcionan separaciones recomendadas para los drenes transversales.
- **Protejer las salidas de drenes transversales** con roca (enrocamiento de protección), maleza o desperdicio maderero, para disipar la energía y evitar la erosión, o localice la salida de los drenes transversales sobre suelos estables resistentes a la erosión, roca o en zonas con abundante vegetación (Figura 7.2b).
- Construir **vados ondulantes superficiales** en lugar de alcantarillas de drenaje transversal, en el caso típico de caminos rurales de baja velocidad con pendientes de menos de 12%. Construir vados superficiales con suficiente profundidad para permitir un drenaje adecuado, y formando un ángulo de entre cero y 25 grados con la perpendicular al camino, con una peralte hacia afuera de 3-5%, y con suficiente longitud (15 a 60 metros) para que circulen vehículos y equipos (véase la Foto 7.2). En el caso de suelos blandos, reforzar el promontorio y el fondo del dren con grava o con roca así como a la salida del dren (Figura 7.3).
- Instalar **drenes transversales de alcantarilla** con un ángulo de 0-30 grados perpendicular al camino, usando una peralte hacia afuera de 2% más alto que la pendiente de la cuneta, a fin de evitar taponamientos (Figura 7.4). (Mayor información acerca de las alcantarillas se puede encontrar en el Capítulo 8). Usar alcantarillas de drenaje transversal en caminos con una cuneta interior y con velocidades de recorrido moderadamente altas.
- Construir caballones desviadores en caminos con poco uso o en caminos cerrados para controlar los escurrimientos superficiales. Colocar los caballones desviadores muy cercanos entre sí formando un ángulo de entre cero y 25 grados con una peralte hacia afuera de entre 3 y 5% y una profundidad de 0,3 a 0,6 metros. Instalar caballones desviadores como se muestra en la Figura 7.5. La separación entre caballones desviadores se presenta en la Tabla 7.2.
- Usar **cunetas de captación de agua** (cunetas de intercepción o coronamiento) a través del terreno natural por arriba de un talud de corte, sólo en aquellas zonas con una alta precipitación pluvial y escurrimientos superficiales altos. Estas cunetas resultan útiles para captar el flujo laminar superficial antes de que derrame sobre el talud del corte y pueda erosionar o desestabilizar el corte. Sin embargo, ellos generalmente no reciben mantenimiento y pueden dar lugar a un estancamiento contraproducente de agua encima del talud, lo cual aumenta las posibilidades de una falla del talud.
- **Evitar el uso de cunetas exteriores** a lo largo del borde externo del camino, excepto en zonas específicas que deben protegerse del flujo laminar para desalojarlo fuera de la superficie del camino. De preferencia use bermas. Para construir una cuneta o berma exterior se necesita ampliar el ancho del camino.

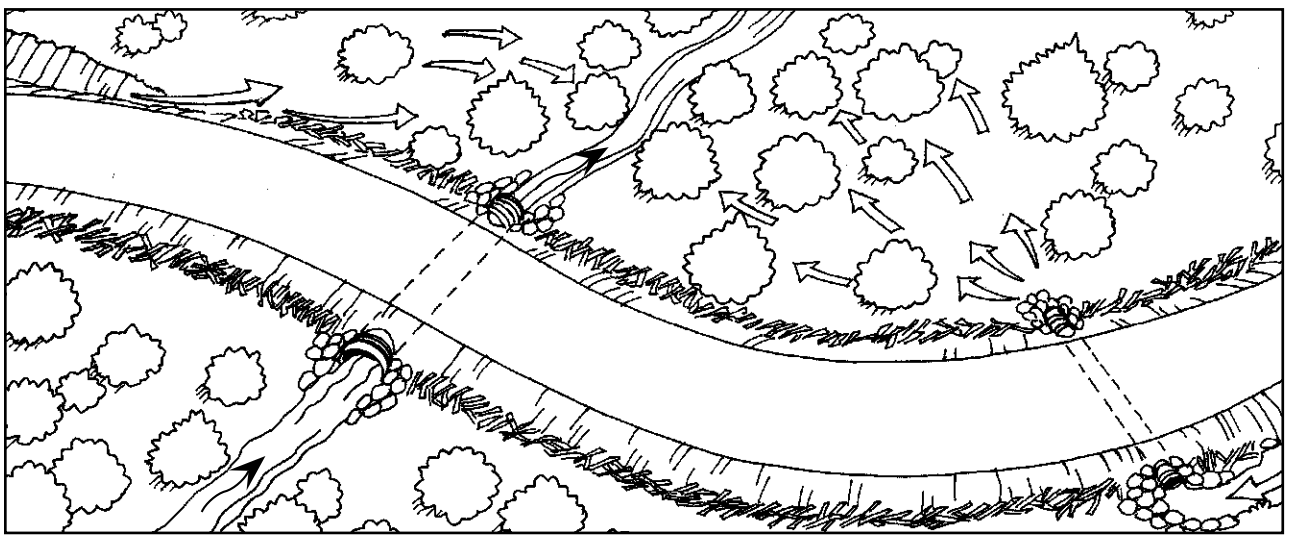
Prácticas Que Deben Evitarse

- Pendientes fuertes sostenidas del camino sobre las que se concentran los escurrimientos.
- Descarga de agua sobre suelos erosionables sin protección.
- Fijar a "simple vista" las pendientes en terrenos planos. Use un clinómetro o un nivel Abney para garantizar que usted cuenta con los taludes o pendientes adecuados.

Figura 7.2

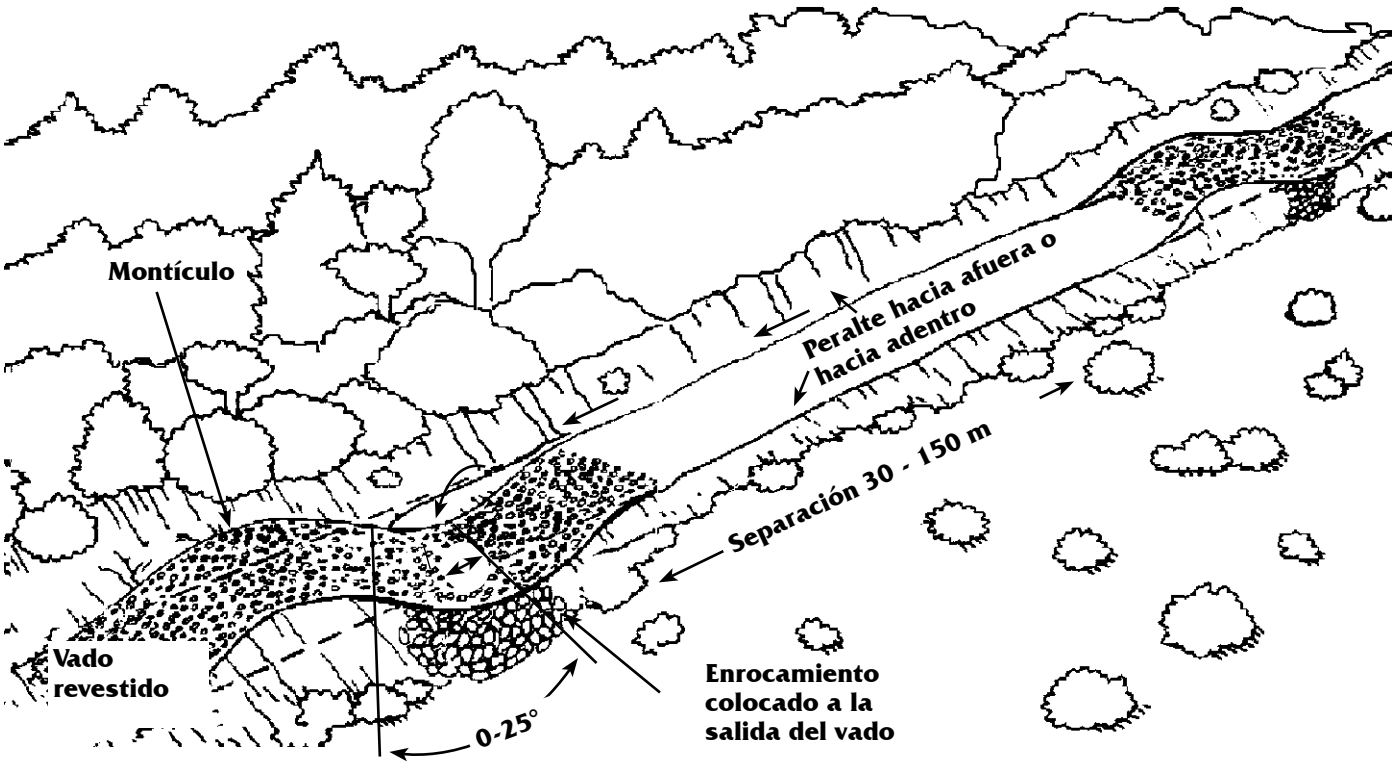


a. Drenaje básico de la superficie de rodadura con peralte hacia afuera, pendientes ondulantes y vados reforzados.

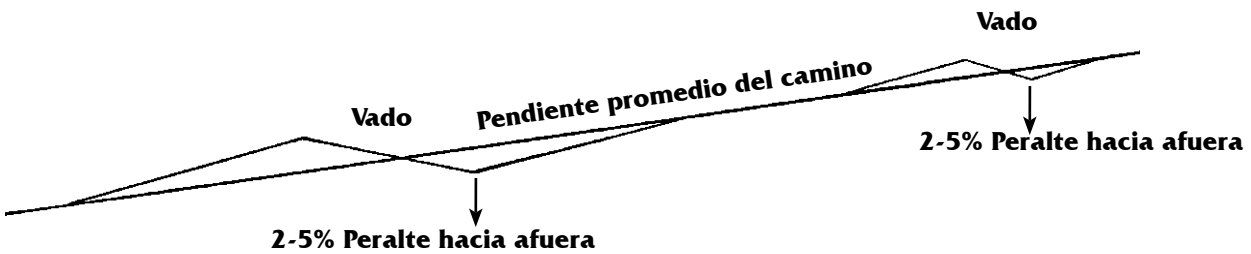


b. Drenaje superficial básico del camino, con cunetas de descarga y drenes transversales de alcantarilla que descargan en la vegetación o en otro tipo de amortiguamiento a los lados del camino. (Adaptado de Montana State Univ. 1991).

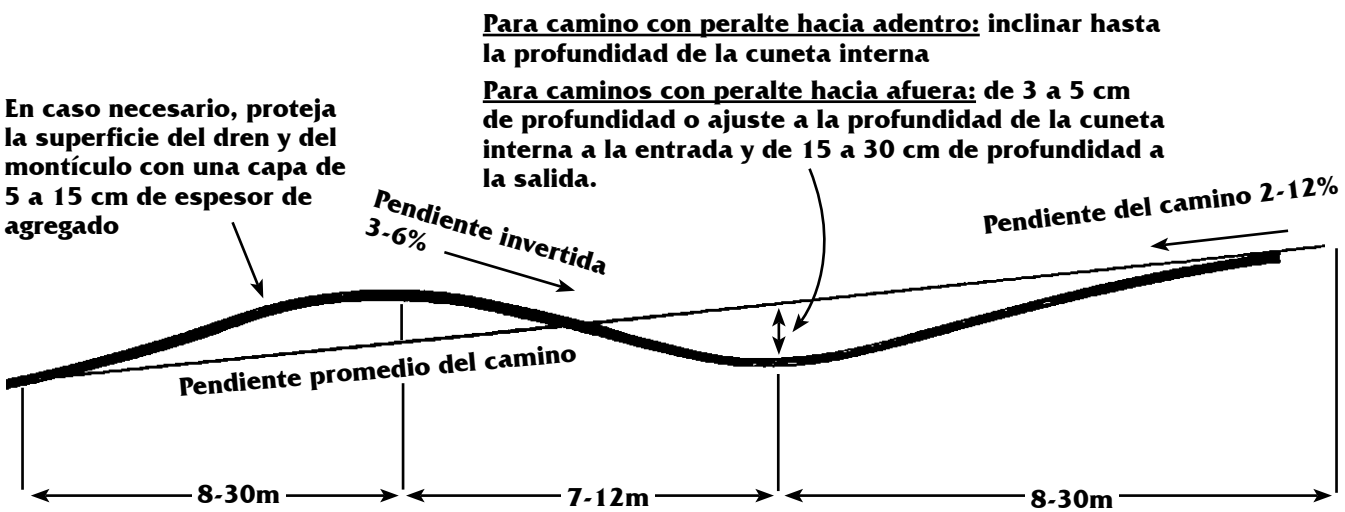
Figura 7.3 Vados ondulantes superficiales (de base ancha).



a. Vista en perspectiva



b. Perfil



c. Detalle del perfil del vado ondulante superficial

Figura 7.4 Drenes transversales de alcantarillas.

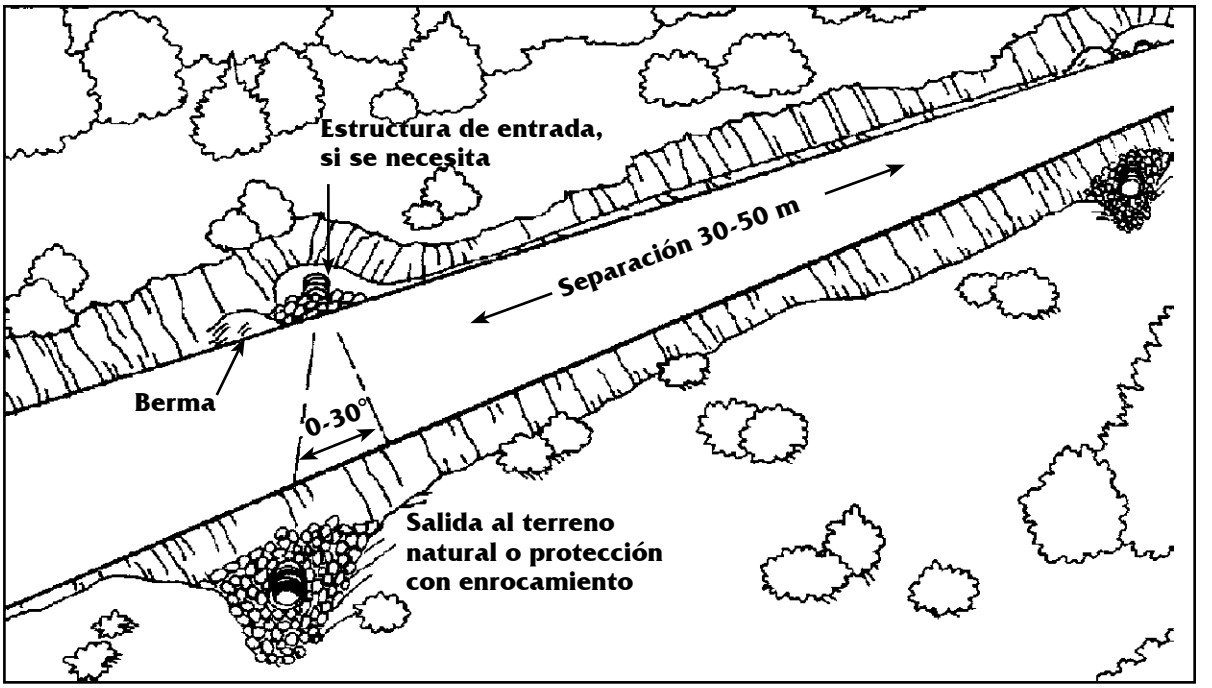
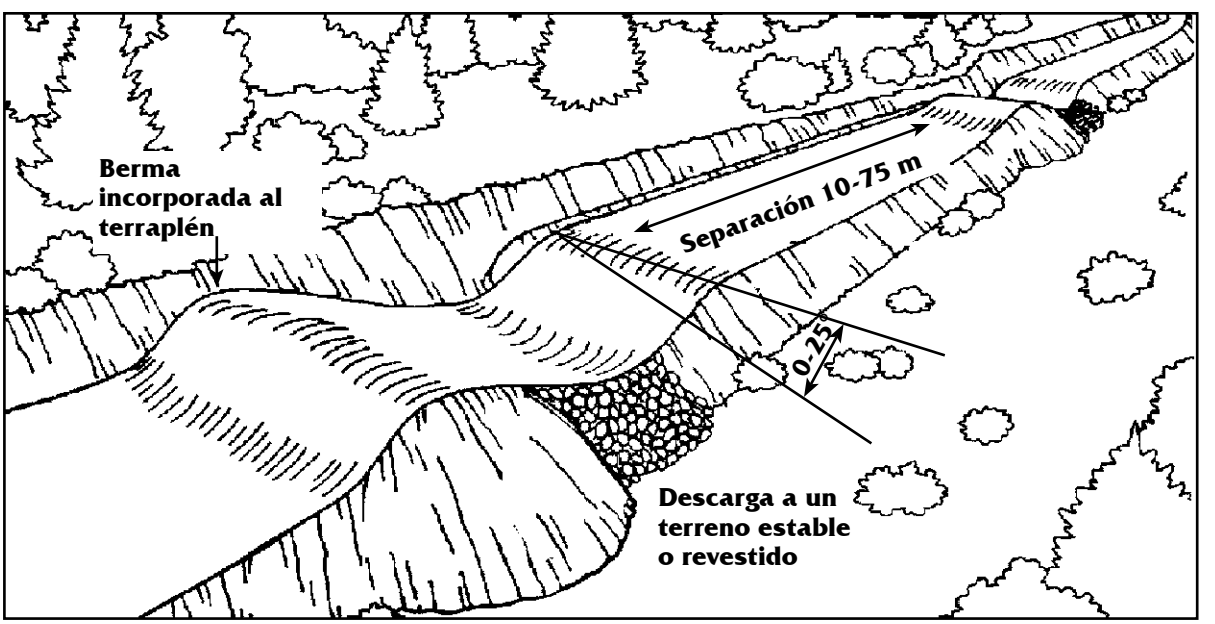
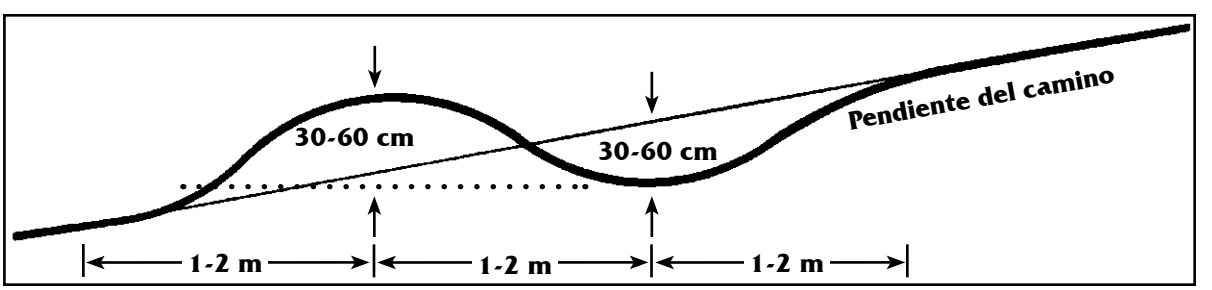


Figura 7.5 Construcción de un caballón desviador. (Adaptado de Wisonsin's Forestry Best Management Practices for Water Quality. 1995, Publication FR093, Wisconsin Department of Natural Resources)



a. Vista en perspectiva



b. Sección transversal

Foto 7.3 Use estructuras de entrada (o boca de caída) hechas de mampostería, concreto o metal para controlar el agua en la cuneta y encauzarla hacia el tubo de drenaje transversal y evitar la socavación de la cuneta.

revestidas. Además la superficie del camino generalmente necesita ser reforzada o recubierta con algún tipo de pavimento para resistir la erosión. Para usos estacionales o de bajo volumen de tránsito, también se pueden construir caballones desviadores provisionales transitables.

Los **caballones desviadores** se emplean para controlar el drenaje en el caso de caminos cerrados o inactivos, en caminos para tracción en las cuatro ruedas, para caminos de arrastre y para senderos de arrastre. Con frecuencia se colocan los caballones desviadores muy cercanos entre sí (véase la Tabla 7.2) para lograr el máximo control de la erosión y se pueden configurar para que circulen vehículos de rodada alta o para bloquear el tránsito.

Foto 7.4 Agregue protección a la salidad del drenaje y/o disipadores de energía, para evitar la erosión y formación de quebradas aguas abajo de la estructura protegida.

CONTROL EN ENTRADAS Y SALIDAS DE DRENES Y EN CUNETAS TRANSVERSALES

El agua debe controlarse, encauzarse o disiparse su energía a la entrada y a la salida de alcantarillas, vados superficiales u otro tipo de estructuras transversales de drenaje. Con esto se garantiza que el agua y los escombros entren al dren transversal eficientemente sin obstruirlo, y que salgan del dren transversal sin dañar a la estructura y sin causar erosión a la salida.

Las estructuras de entrada de alcantarillas generalmente se colocan en la línea interior de cunetas en donde se ubica un dren transversal en forma de alcantarilla. Comúnmente se construyen a base de concreto, mampostería (Foto 7.3), o de un tubo metálico de sección circular, como se muestra en la Figura 7.6. Típicamente se usan donde la cuneta esté erosionando y socavando, de tal forma que la estructura controla la elevación de la cuneta. Las estructuras de entrada resultan también de utilidad para cambiar la dirección del agua que fluye hacia la cuneta, sobre todo en pendientes empinadas, y ayudan a estabilizar la margen excavada por detrás de la entrada del tubo.

La salida de los tubos y de los drenes se localiza idealmente en una zona estable de suelo no erosionable, o en un área con mucha vegetación o rocosa. La velocidad acelerada del agua que se elimina de una calzada puede originar una erosión severa o formar barranquillas si se descarga directamente sobre los suelos erosionables (Foto 7.4). Se puede estabilizar el tubo, el dren o la boca de salida del dren, y se puede disipar la energía del agua al descargarla

sobre 1 a 2 metros cúbicos de un enrocamiento de protección bien graduado, como se observa en la Figura 7.7. Entre otras medidas de disipación de energía se incluye el uso de tanques amortiguadores, vertedores de protección reforzados, o el empleo de vegetación densa o de lecho de roca sólida. (Foto 7.5).

Las cunetas en caminos con pendientes fuertes en suelos erosionables y con velocidades de flujo de más de un metro por segundo podrían requerir acorazarse o colocar un dique pequeño de cuneta, o también construir estructuras de contención dentro de la cuneta para reducir la velocidad del agua, como se ilustra en la Figura 7.8. Las cunetas generalmente se protegen con pasto, con esteras para control de la erosión, roca o pavimento de mampostería o de concreto (Foto 7.6). Los pastos

Foto 7.5 Proteja la descarga del tubo de alcantarilla y los drenes de vados superficiales mediante enrocamiento o un vertedero de protección de mampostería, o seleccione áreas con roca sana o con vegetación densa.

Prácticas Recomendadas

Control en entradas y salidas

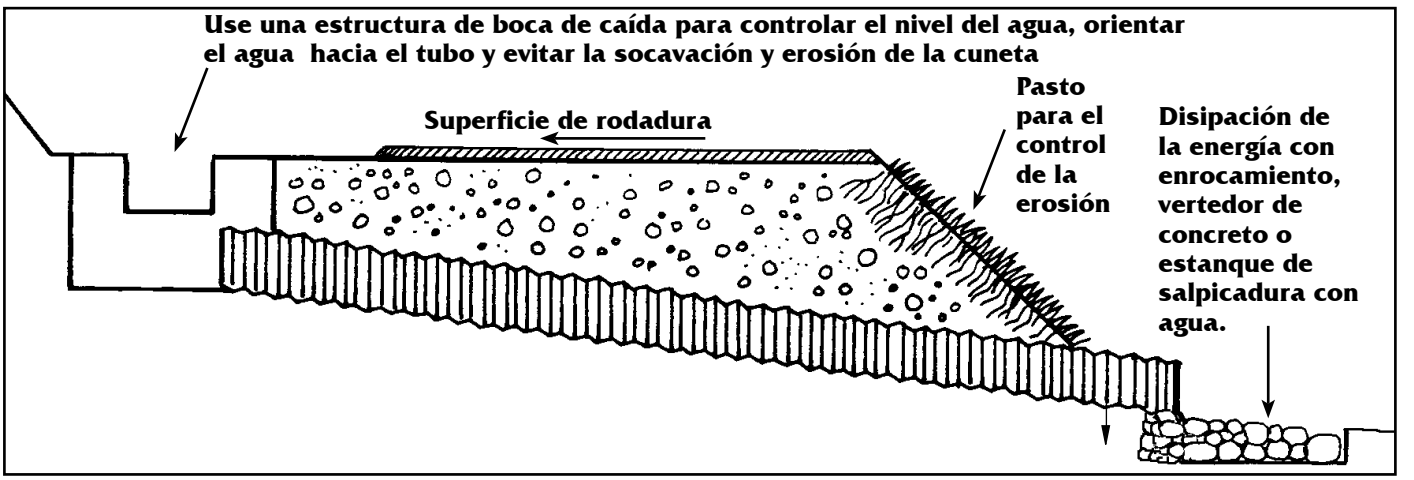
- Use estructuras de bocas de caída en los drenes transversales de alcantarilla cuando haga falta controlar la pendiente de la cuneta, para evitar la erosión descendente de la cuneta, o donde el espacio esté limitado con respecto al corte en las márgenes (Figura 7.6). Alternativamente use cuencas de captación excavadas en suelo firme.
- Descargue las alcantarillas y los drenes empedrados de drenaje transversal al nivel del terreno natural, sobre suelo firme no erosionable o en zonas rocosas o con matorrales. Si se descarga sobre los taludes del terraplén, acorace las salidas con enrocamiento de protección o con desperdicio maderero, o use estructuras de drenaje hacia abajo (Figuras 7.3, 7.4, 7.7 y Figura 8.1). Haga sobresalir el tubo entre 0,5 y 1,0 m con respecto al pie del talud de terraplén para evitar erosión del material de relleno.
- En suelos erosionables, proteja las cunetas de la calzada y las cunetas de descarga con enrocamiento (Foto 7.7), mampostería, revestimiento de concreto, o, como mínimo, con pasto. También se puede usar las estructuras de diques de cuneta para disipar la energía y para controlar la erosión de las cunetas (Figura 7.8).
- Descargue los drenes de la calzada en una zona con capacidad de infiltración o en franjas filtrantes para atrapar a los sedimentos antes de que lleguen a una vía fluvial. Mantenga "desconectados" hidrológicamente al camino con respecto a los arroyos.

Prácticas Que Deben Evitarse

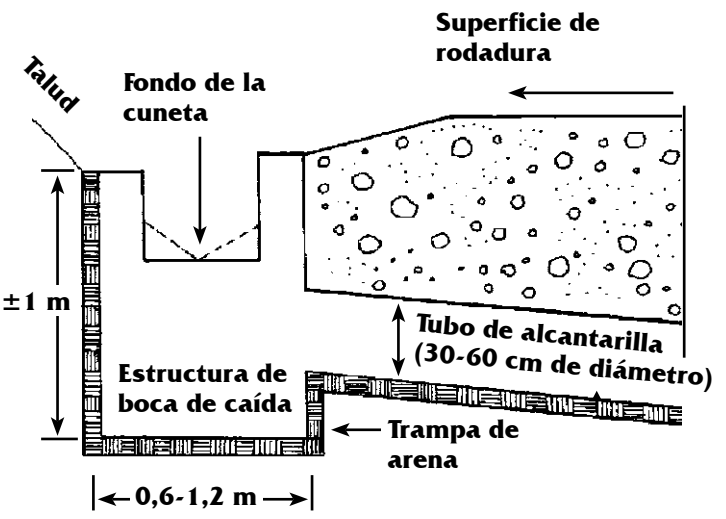
- Descargar un tubo de drenaje transversal o dren empedrado en algún talud de terraplén desprotegido o en suelo desnudo susceptible a la erosión.
- Descargar los tubos de drenaje transversal a media altura del talud del terraplén.
- Descargar los tubos de drenaje transversal o los drenes empedrados sobre laderas naturales inestables.

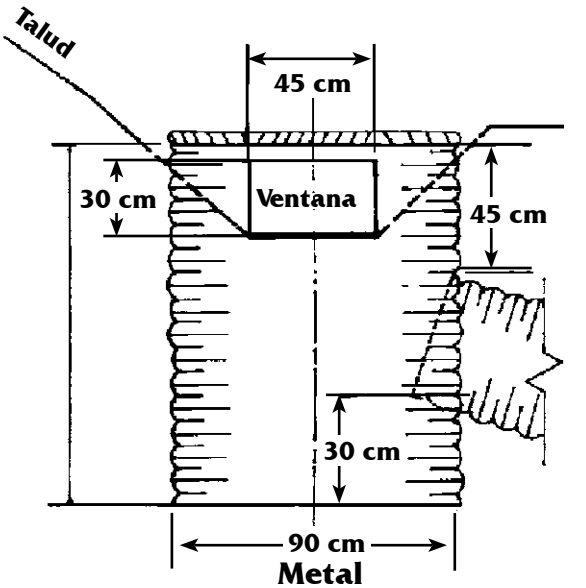
Foto 7.6 Proteja a las cunetas con vegetación, roca, mampostería o concreto para resistir la erosión de la cuneta y desalojar el agua hacia un punto de salida establecido.

Figura 7.6 Tipos comunes de estructuras de boca de caída (con drenes transversales de alcantarilla).



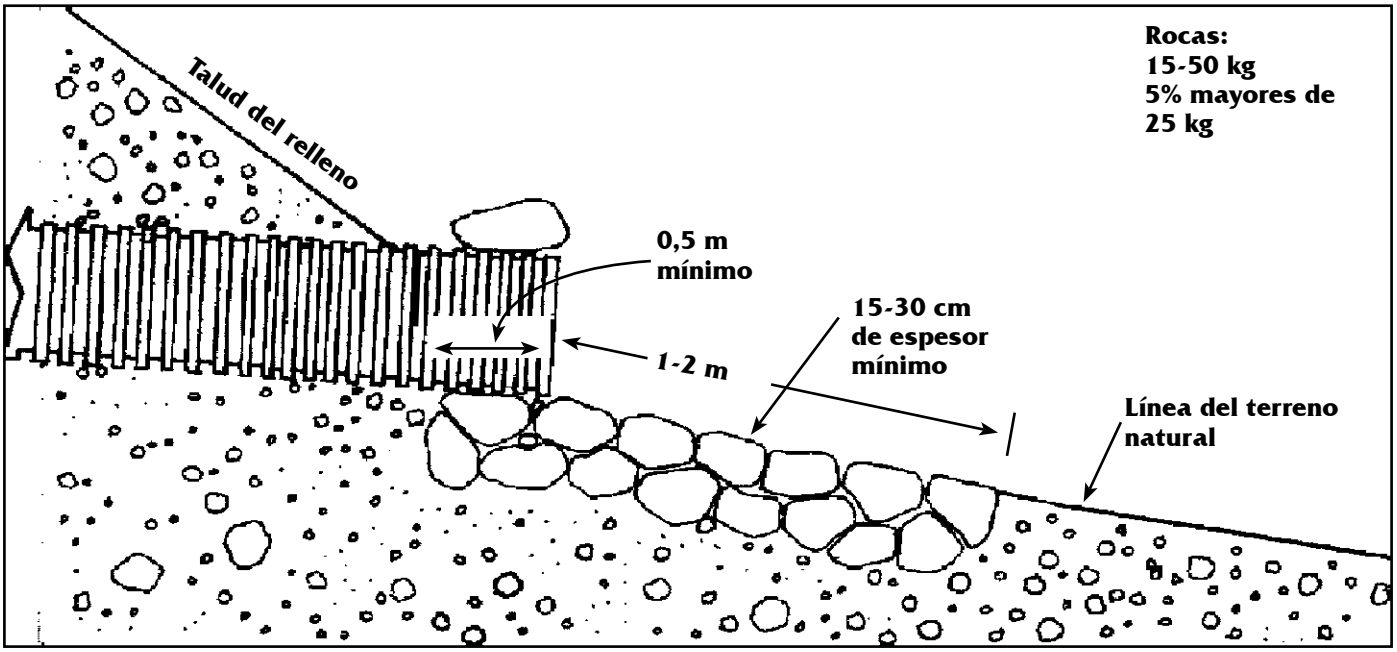
a. Información General





b. Detalles de diseño e instalación

Figura 7.7 Detalle de la protección a la salida de una alcantarilla con roca.



pueden resistir velocidades de flujo de entre 1 y 2 metros por segundo. Un revestimiento durable como puede ser enrocamiento de protección bien graduado se recomienda en pendientes de más de 5% en suelos erosionables o para velocidades de más de unos cuantos metros por segundo. Los diques de cuneta evitarán la erosión de la cuneta y pueden servir para detener los sedimentos, aunque se necesita limpiarlos periódicamente, por lo que el mantenimiento es imprescindible. Entre los materiales más comunes para la construcción de diques en cunetas está la roca suelta, mampostería, concreto, bambú, postes de madera, etc. Todas las estructuras de los diques deben anclarse a las paredes de la cuneta y se necesita una ranura sobre cada estructura para mantener el flujo en la parte media de la cuneta.

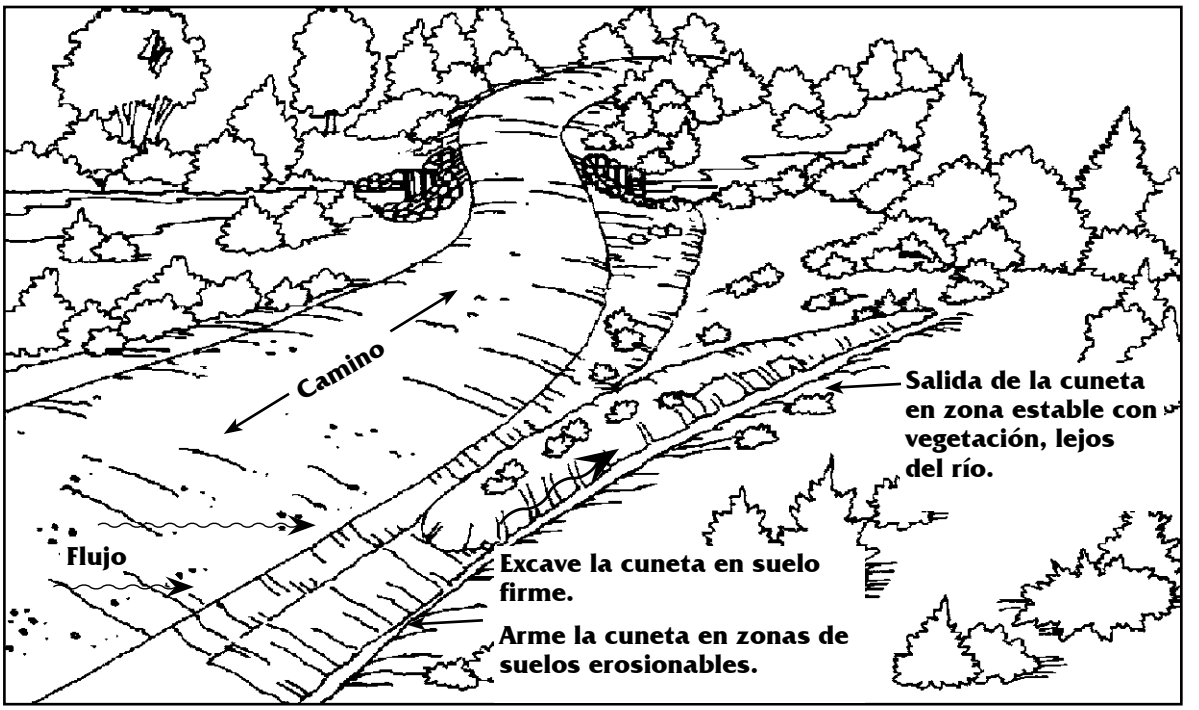
Foto 7.7 Cuneta protegida con enrocamiento y boca de caída para controlar el agua y evitar la socavación de la cuneta.

CRUCES DE ARROYOS NATURALES

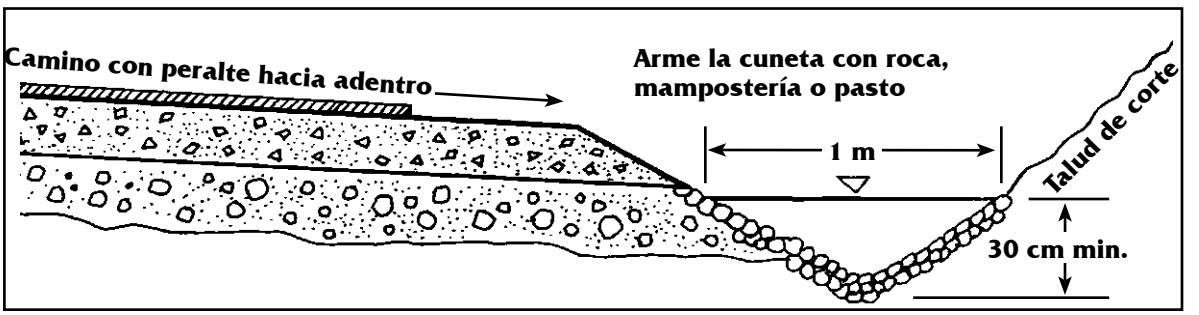
Los cruces de caminos sobre cauces de drenaje naturales o arroyos requieren de conocimientos hidrológicos e hidráulicos para su diseño, a fin de poder determinar el tamaño adecuado y el tipo de estructura, según se comentó en los Capítulos 5 y 6. Las dimensiones de estructuras para drenajes pequeños se pueden definir mediante la Tabla 8.1. La selección de la estructura incluye por lo general tubos de alcantarilla, alcantarillas en arco o de cajón, vados para caudales en estiaje, o puentes, como se muestra en la Figura 7.9.

Debido a que los cruces de drenaje se ubican en zonas de agua en movimiento, su construcción puede resultar costosa y pueden tener impactos negativos importantes sobre la calidad del agua. Entre los impactos de un diseño inadecuado o de la instalación de

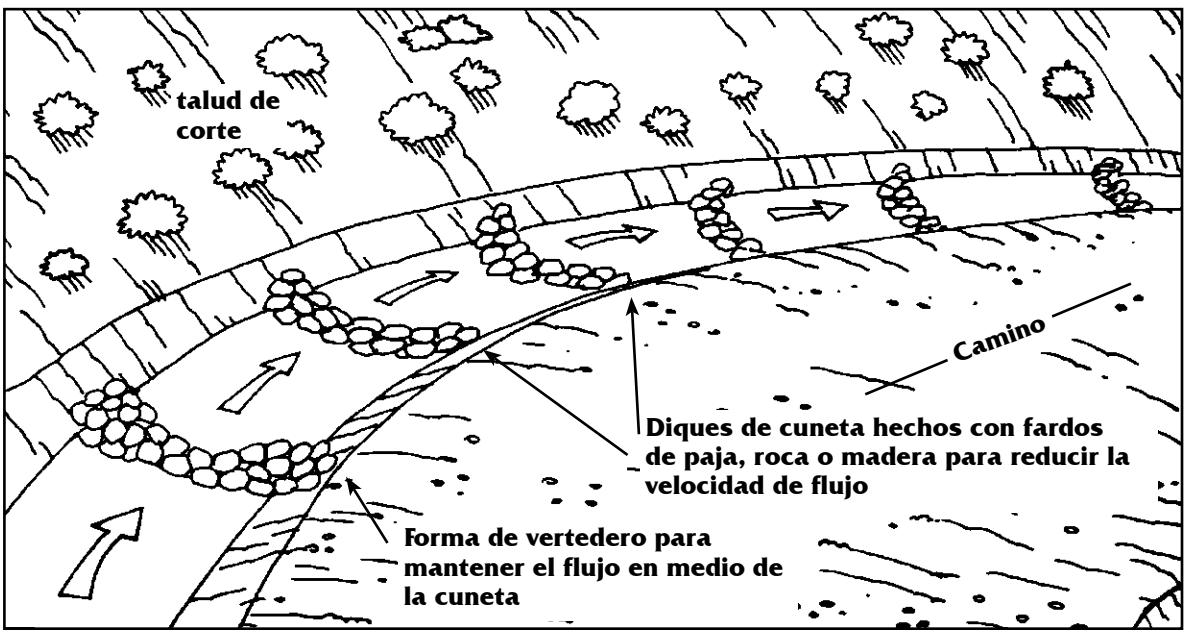
Figura 7.8 Cunetas y revestimiento (o revestimiento) de cunetas.



a. Configuración de la cuneta y descarga (Adaptado de Wisconsin's Forestry Best Management Practices for Water Quality, 1995)



b. Revestimiento y geometría típicos de una cuneta

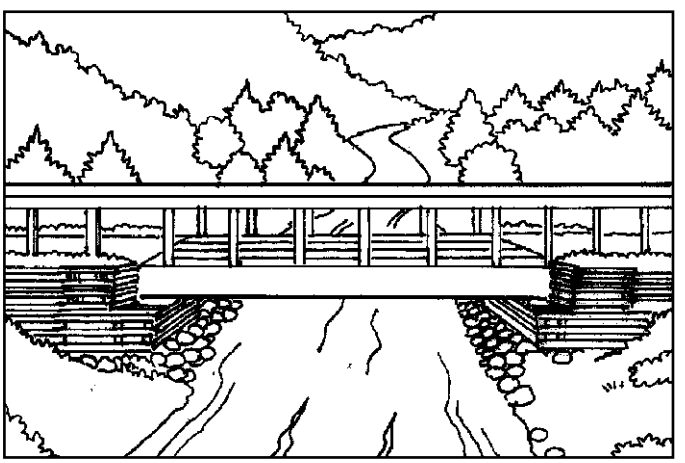


c. Uso de diques de cunetas

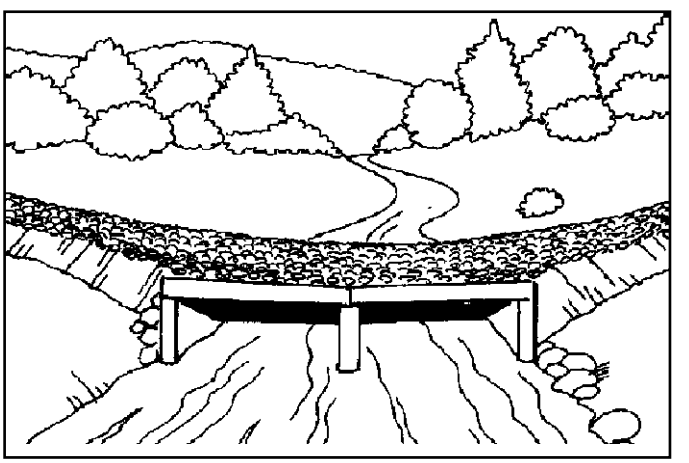
estructuras se pueden mencionar la degradación de la calidad del agua, la erosión de las márgenes, la socavación del cauce, retrasos en el tránsito, y reparaciones costosas en caso de falla de una estructura. Por otro lado, las estructuras pueden afectar en gran medida a los peces en todas las etapas de su vida, así como a otras especies acuáticas. Los cruces de arroyos deben ser tan cortos como resulte posible y colocarse perpendiculares al cauce (Foto 7.8). Se deberá acorazar tanto el camino como las cunetas, las cunetas deberán desviar el agua superficial antes de que llegue al cauce del arroyo, y la construcción deberá minimizar la zona de afectación, como se observa en la Figura 7.10. Los cruces grandes de drenaje deberán someterse a un análisis adecuado al sitio en particular con parámetros de diseño locales, idealmente realizado por un ingeniero con experiencia en hidráulica y por otros especialistas.

En drenajes con valores inciertos del caudal, con grandes cantidades de escombros en el cauce, o en sitios donde existan tuberías con diámetros limitados e inadecuados, existe un gran riesgo de que se obturen los tubos de alcantarilla y de que el sitio sea erosionado o llegue a fallar. En tales áreas, o en cuencas de captación particularmente sensibles, es muy aconsejable la protección contra desbordamiento. Un punto bajo en el relleno y un "vertedor" revestido para desborde, como se ilustra en las Figuras 7.11 a y b, servirán para proteger el relleno y para mantener el flujo dentro del mismo drenaje, con lo que se reduce el potencial de desvío y generalmente se evita una falla. Un tubo tapado que desvía el agua del arroyo hacia un camino puede ocasionar una gran cantidad de daños fuera del sitio, dar lugar a la formación de barrancas, o causar deslizamientos, como se aprecia en las Figuras 7.11 c y d. Las estructuras de desbordamiento no se deberían usar en sustitución de un buen diseño hidráulico, sino que más bien deben ofrecer una función de "seguro barato" contra

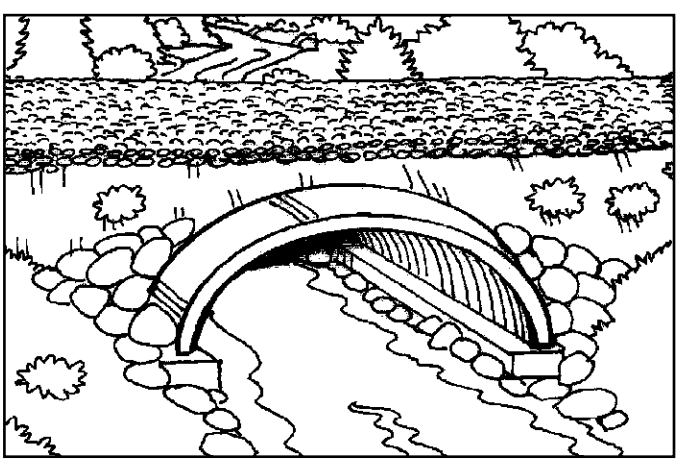
Figura 7.9 Opciones de estructura para el cruce de arroyos naturales. (Adaptado de Ontario Ministry of Natural Resources, 1988)



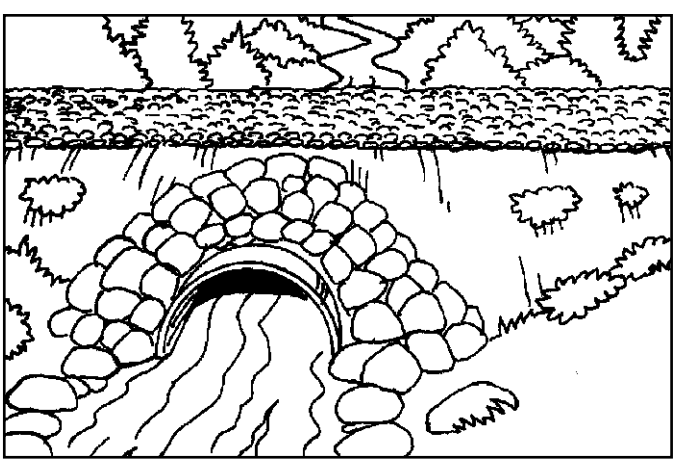
a. Puente



b. Cruce en estiaje (Vado)



c. Tubo en arco



d. Alcantarilla con uno o varios tubos

Prácticas Recomendadas

Cruces de arroyos naturales

- Usar estructuras de drenaje que mejor se adapten a la configuración del cauce natural y que idealmente sean tan anchas como el canal activo del arroyo (ancho con el caudal máximo). Minimizar los cambios en el cauce natural y el volumen de excavación o de relleno en el canal.
- Limitar las actividades de construcción a periodos de bajo caudal en arroyos perennes. Minimizar el uso de equipos dentro del arroyo.
- Diseñar estructuras y usar procedimientos de construcción que minimicen los impactos sobre los peces y otras especies acuáticas, o que puedan mejorar el paso de peces.
- Cruzar canales de drenaje lo menos posible. En caso necesario, cruzar los arroyos en ángulo recto, excepto donde no lo permitan los rasgos del terreno (Figura 7.10).
- Mantener los accesos a cruces de arroyos con una pendiente lo más suave posible en la práctica. Hacer que las pendientes sean ondulantes al llegar y al alejarse de los cruces a fin de dispersar el agua.
- Estabilizar el suelo alterado alrededor de los cruces tan pronto termine la construcción. Retirar o proteger el material de relleno colocado dentro del cauce y en la llanura de inundación.
- Usar puentes, vados para caudales en estiaje o vados mejorados, así como grandes tubos en arco con el fondo natural del arroyo siempre que sea posible para maximizar la capacidad de flujo, minimizar la posibilidad de una tubería tapada, o minimizar los impactos sobre especies acuáticas.
- Ubicar los cruces donde el alineamiento del arroyo sea recto, estable y no cambie su geometría. Los lugares subyacidos por roca sana son recomendables para estructuras de concreto.
- Para la protección por desbordamiento, construir los rellenos sobre alcantarillas con un punto bajo protegido cercano a la tubería en el caso de rellenos de baja altura, o agregar un vado superficial revestido sobre el terreno natural justamente al terminar un relleno grande para regresar el agua al drenaje y evitar la falla fuera del sitio (Figura 7.11).
- Estabilizar los accesos del camino a cruces de puentes, vados o alcantarillas con grava, roca u otro tipo de material adecuado a fin de evitar en lo posible que los sedimentos sobre la superficie del camino lleguen al arroyo (Figura 7.12). Instalar drenes transversales a ambos lados de un cruce para evitar que los escurrimientos sobre el camino y a lo largo de la cuneta descarguen en el canal de drenaje.
- Construir los rellenos para puentes y para alcantarillas más altos que el acceso del camino para evitar que el escurrimiento de la superficie del camino drene directamente en el arroyo –pero ÚNICAMENTE si la probabilidad de falla de la alcantarilla es MUY pequeña (Figura 7.13). Típicamente el cruce debería diseñarse para minimizar el volumen de relleno.

Prácticas Que Deben Evitarse

- Trabajar con equipos en el cauce natural desprotegido.
- Localizar los cruces de arroyos en canales sinuosos o inestables.
- Afectar de manera negativa la vida de los peces con una estructura de cruce de arroyos.
- Permitir que el escurrimiento de cunetas a los lados del camino descargue directamente en los arroyos.

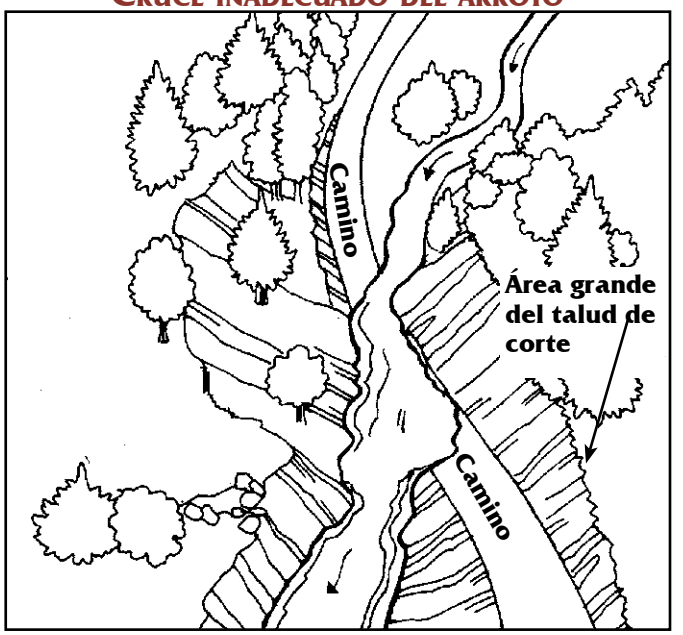
fallas en los cruces de alcantarillas.

CRUCES DE ZONAS INUNDADAS Y DE PRADERAS; USO DE SUBDRENAJE

Los cruces de caminos en zonas de humedales, incluyendo praderas inundadas, pantanos, zonas con altos niveles freáticos, y fuentes de manantiales son problemáticos y poco recomendables. Los humedales son ecológicamente zonas valiosas, y resulta difícil construir sobre ellas, explotar la madera o realizar otras operaciones. Los suelos en estas áreas son generalmente débiles y se necesita un refuerzo considerable de la subrasante. Las medidas de drenaje resultan costosas y pue-

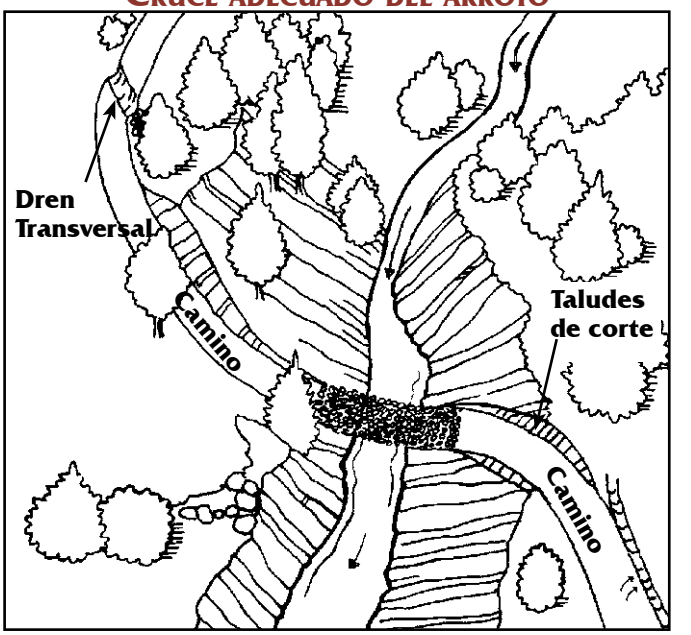
Figura 7.10 Cruces de drenajes naturales. Minimice el área alterada mediante una lineación del cruce perpendicular al arroyo y acorace la superficie de rodadura.

Cruce inadecuado del arroyo



Los cruces casi paralelos al drenaje ocasionan una área alterada grande en el canal, los márgenes del arroyo y los cortes de acceso.

Cruce adecuado del arroyo

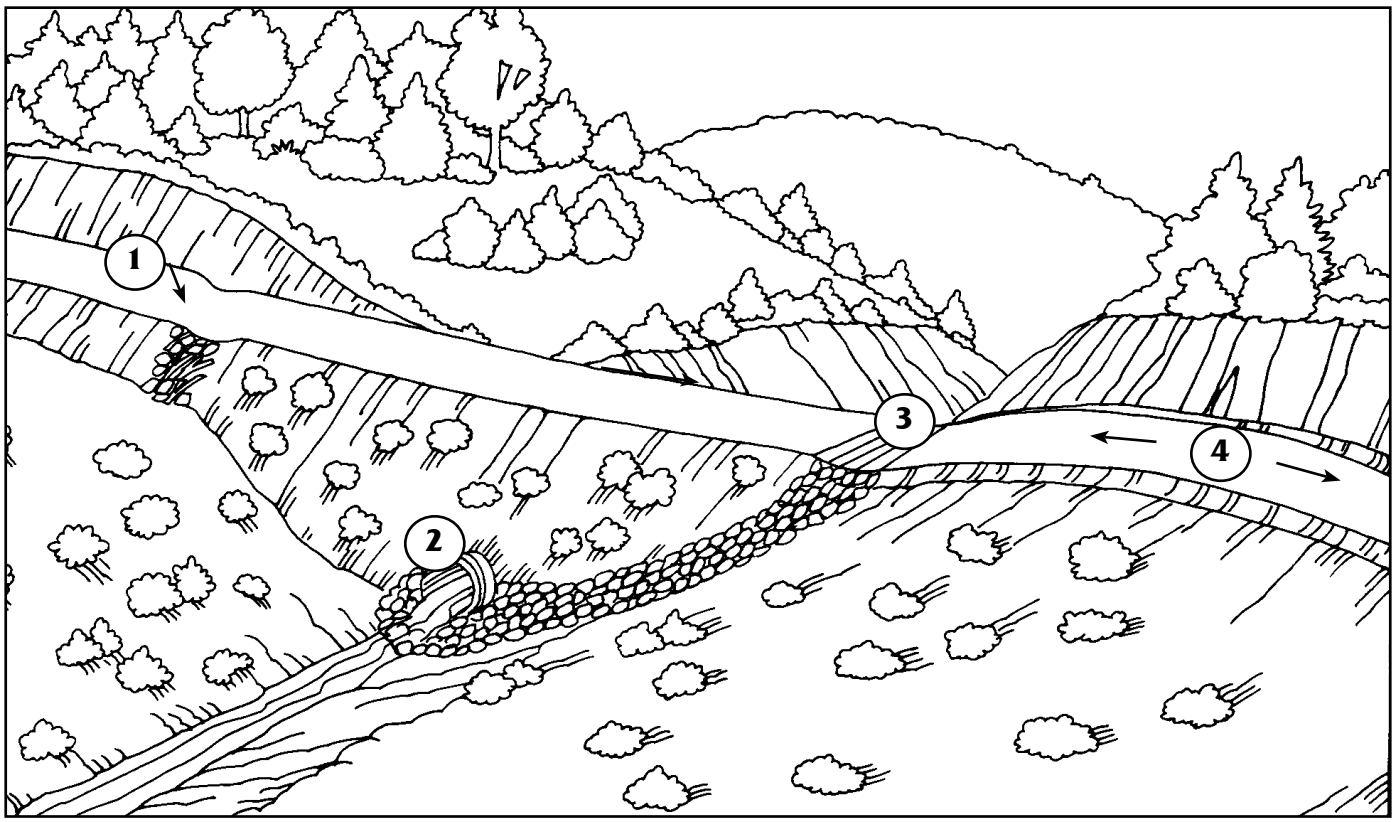


Los cruces de drenaje perpendiculares al arroyo minimizan el área alterada. Acorace el cruce del arroyo y la superficie de rodadura.

Foto 7.8 Evite cruces del drenaje natural que sean anchos y que no sean perpendiculares al drenaje. ¡Aléjese del arroyo! Este canal ancho es un buen sitio para un vado simple o un vado mejorado con alcantarillas.

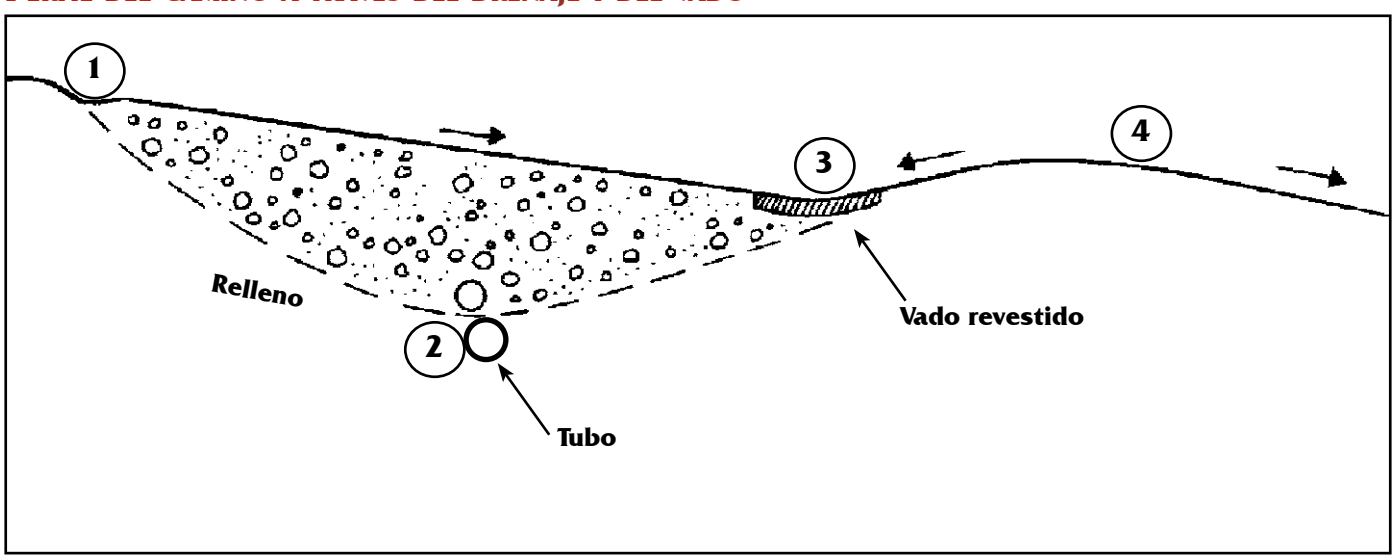
Figura 7.11 Protección de Alcantarillas contra desbordamiento.

Alcantarilla instalada con protección, usando un vado contra desbordamiento revestido para evitar el arrastre y la falla del terraplén



1 Vado Ondulante Superficial
2 Alcantarilla
3 Vado de protección contra el desbordamiento
4 Punto alto en el perfil del camino

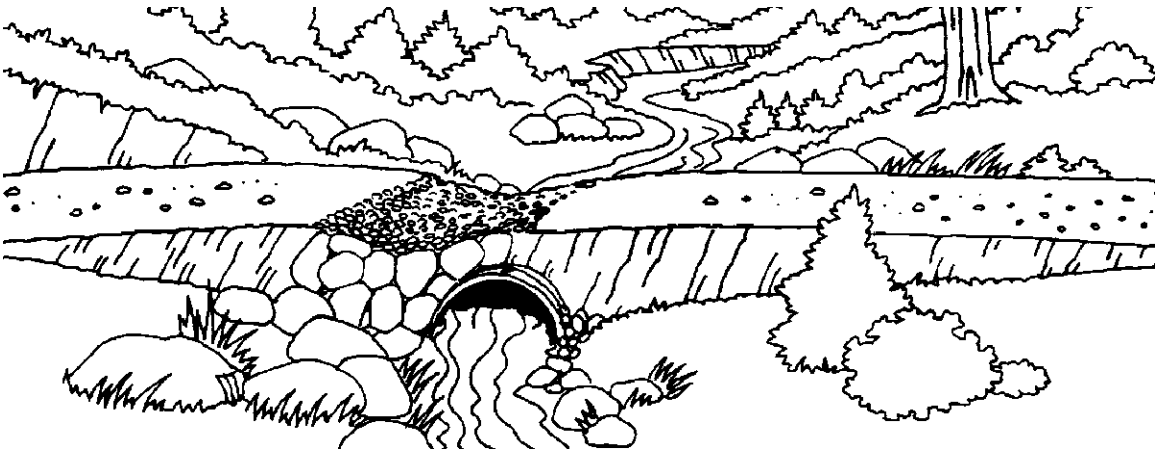
Perfil del camino a través del drenaje y del vado



a. Protección de la alcantarilla con un vado de desbordamiento en un cruce en terraplén de un arroyo. (Adaptado de Weaver and Hagans, 1994)

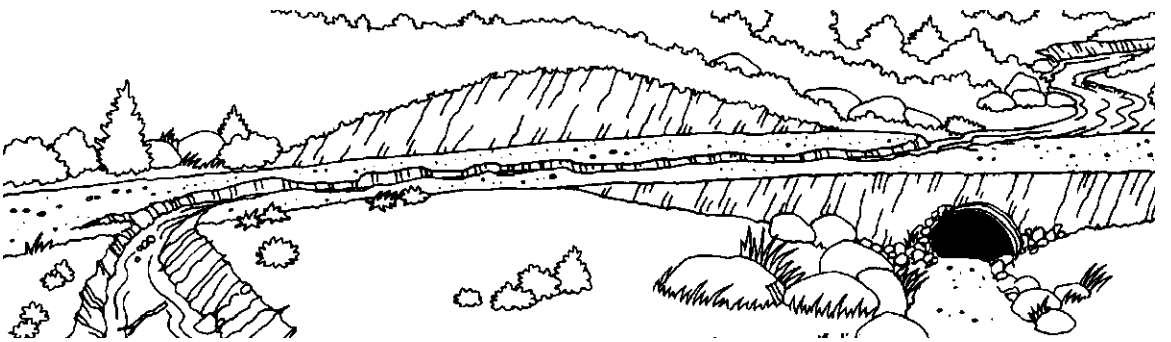
Figura 7.11 Protección de Alcantarillas contra desbordamiento. (continuación)

BUENA PRÁCTICA DE INSTALACIÓN

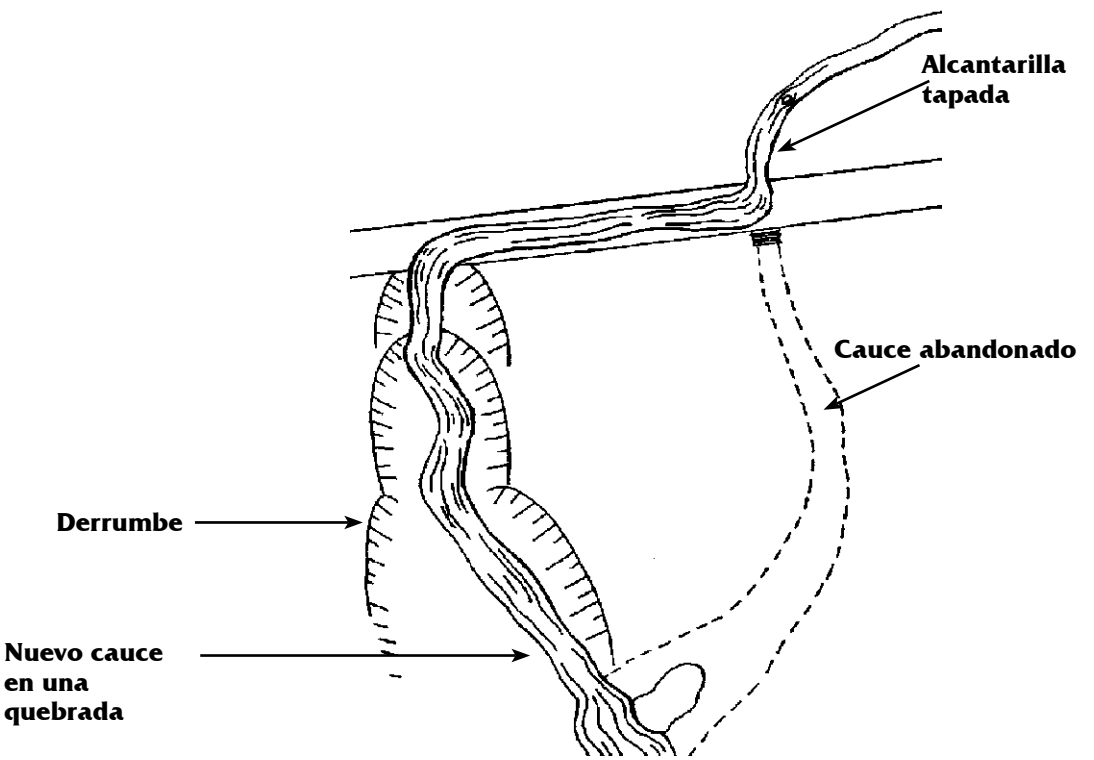


b. Vado revestido por encima de un relleno de baja altura para evitar el desvío del arroyo.

MALA INSTALACIÓN

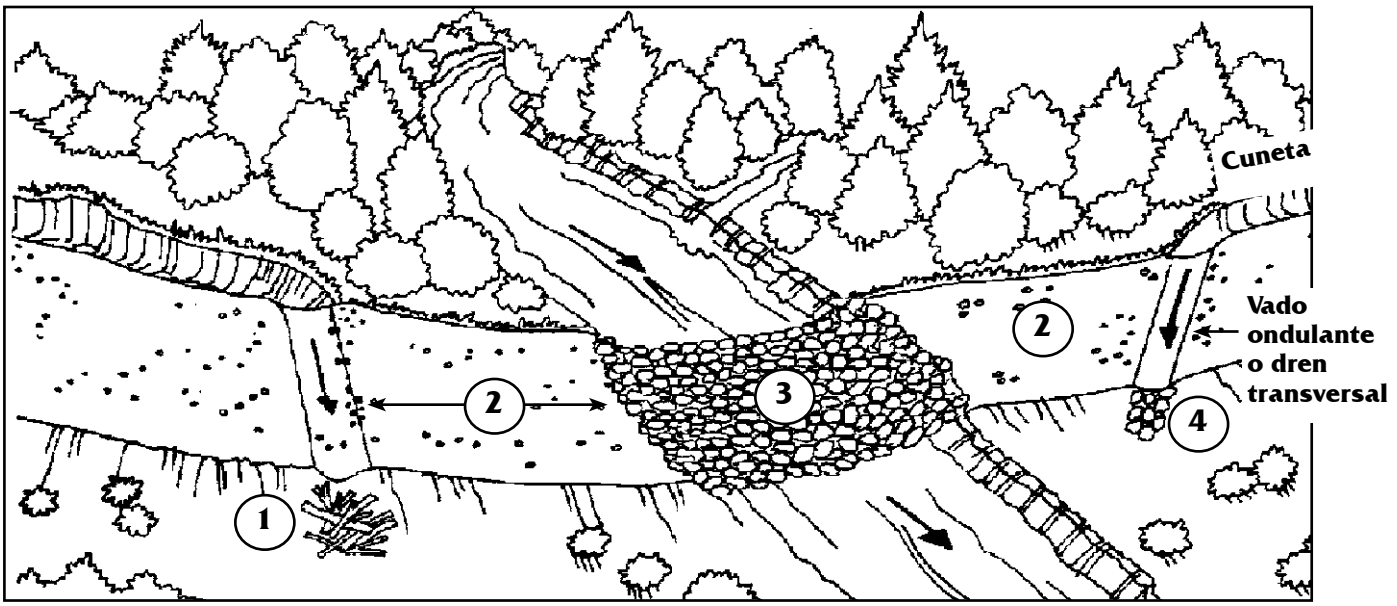


c. Croquis de un arroyo desviado hacia abajo de un camino, formando un nuevo cauce después de haberse tapado la tubería.



d. Consecuencias del desvío de un arroyo fuera de su cauce natural. (Adaptado de M. Furniss, 1997)

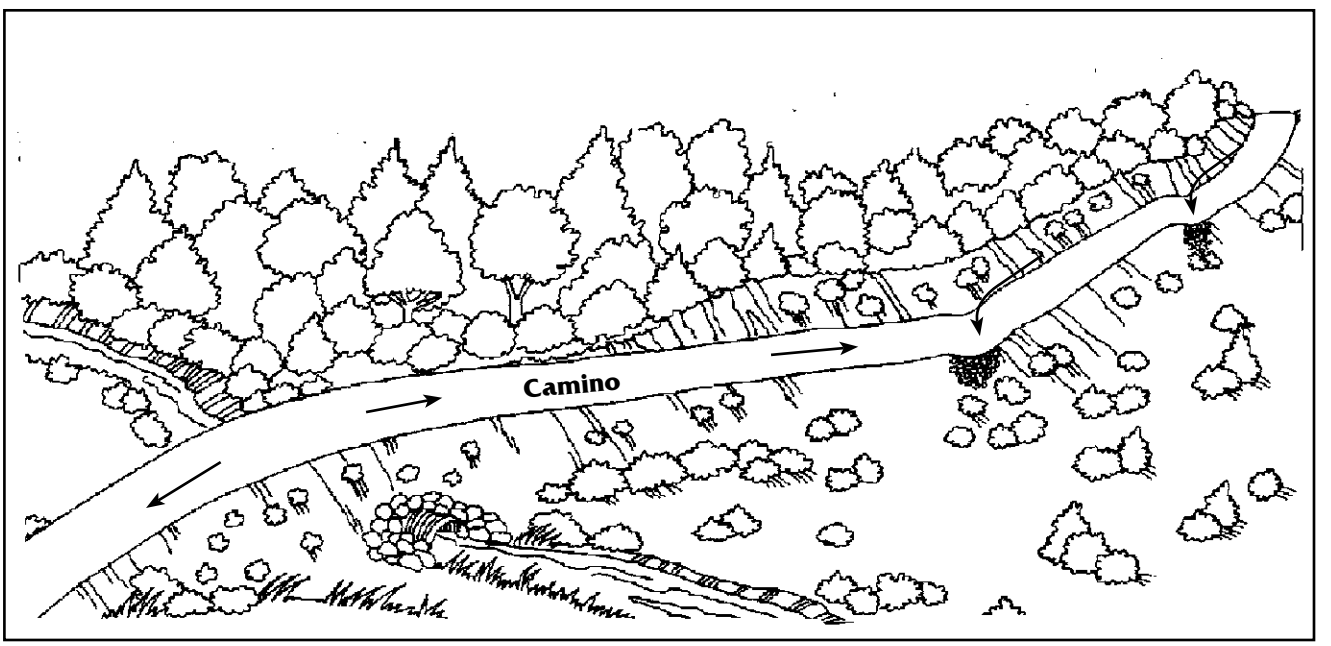
Figura 7.12 Medidas de protección en cruces de arroyos.



1. Escombros
2. Refuerzo de piedra o de grava de 15 a 30 m
3. Fondo del arroyo endurecido
4. Enrocamiento (roca)

Arme o estabilice el cruce actual del arroyo (vado), agregue un revestimiento a la base del camino y drene el agua fuera de la superficie del camino, antes de llegar al cruce. Establezca el revestimiento del cuace del arroyo a la elevación del fondo natural del arroyo.

Figure 7.13 Punto alto por encima del cruce. (Adaptado de Wisconsin's Forestry Best Management Practices for Water Quality, 1995)



Si son pocas las posibilidades de que ocurra una falla por taponamiento, coloque el relleno directamente sobre una alcantarilla más alta que el acceso del camino, para evitar que el escurrimiento de la superficie del camino fluya hacia la estructura de cruce y descargue en el arroyo.

den tener una eficiencia limitada. Por lo tanto, **¡se debería evitar las zonas inundadas!**

Si se tienen que cruzar humedales y no se pueden evitar, se deberán utilizar métodos especiales de drenaje o de construcción para reducir los impactos originados por el cruce. Entre ellos se incluyen tuberías múltiples de drenaje (Foto 7.9) o roca gruesa permeable para dispersar el flujo, reforzar la subrasante con roca gruesa permeable, controlar la pendiente y el uso de capas de filtro y geotextiles, como se muestra en la Figura 7.14. La finalidad es mantener el nivel natural de las aguas subterráneas y que los patrones de flujo se dispersen por toda la pradera, y al mismo tiempo proporcionar una superficie estable y seca para la calzada.

Las zonas húmedas locales se pueden cruzar temporalmente, o "puentear" usando troncos, esteras de aterrizaje, llantas, agregados, etc. (véase la Figura 7.15). Idealmente, la estructura temporal quedará aislada de la zona húmeda mediante una capa de geotextil. El geotextil facilita la remoción del material temporal y minimiza el daño al sitio. Por otro lado, una capa de geotextil puede proporcionar un cierto refuerzo así como una barrera de separación para evitar que el agregado y otros materiales penetren en la subrasante blanda.

El subdrenaje, mediante el uso de subdrenes o de capas de agregado para filtro, se emplea comúnmente a lo largo de un camino en zona húmedas o de manantiales localizados, o áreas de cortes saturados con filtraciones, para **eliminar específicamente** el agua subterránea y para mantener seca la capa subrasante del camino (ver Foto 6.4). En un diseño típico de subdrenaje se usa una zanja de intercepción de entre 1 y 2 metros de profundidad, rellenada con roca permeable, como se ilustra en la Figura 7.16. El subdrenaje se necesita generalmente en zonas húmedas localizadas y resulta mucho más costo-efectivo que tener que agregar una sección estructural gruesa al camino o hacer frecuentes reparaciones al camino. El diseño y los requisitos de filtración para el subdrenaje se describen en el Capítulo 6 y en otras referencias.

En grandes zonas inundadas o de pantano el subdrenaje con frecuencia no resulta efectivo. En este caso habrá necesidad de elevar la plataforma del camino muy por arriba del nivel freático, como puede ser la subrasante del camino elevada, o que el diseño del pavimento debería considerar una subrasante débil y saturada para la cual se necesitará una sección estructural relativamente gruesa. Comúnmente se recurre a una capa gruesa de agregados cuyo espesor está basado en la resistencia del suelo y en las cargas anticipadas transmitidas por el tránsito.

Foto 7.9 Evite el cruce de zonas de praderas inundadas. Si se tiene que cruzar, use tubos múltiples para poder dispersar el flujo de agua a través de la pradera.

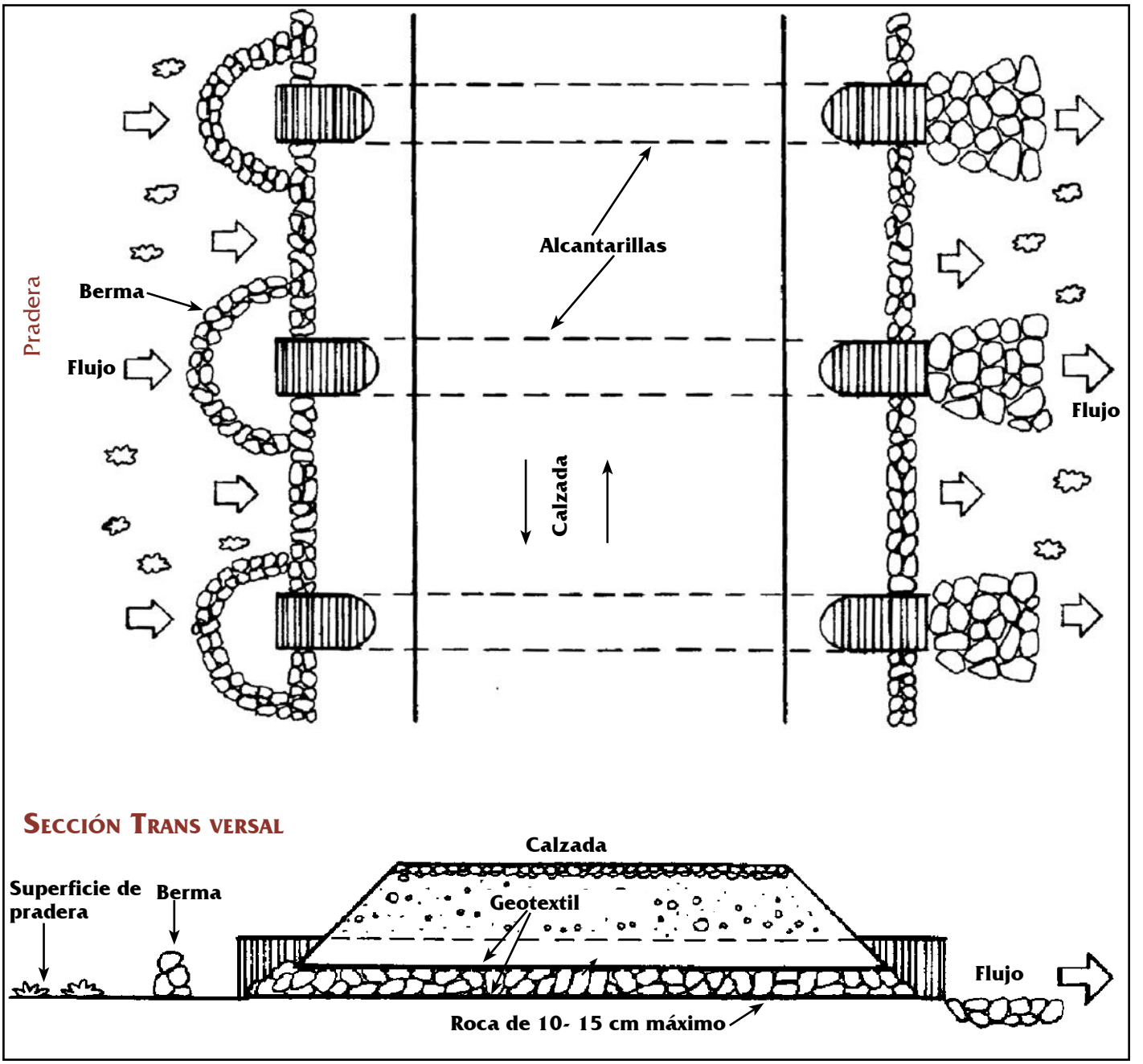
Prácticas Que Deben Evitarse

- Cruce innecesario de zonas inundadas o áreas de ciénegas.
- Concentrar el flujo de agua en praderas o cambiar los patrones naturales de flujo del agua superficial y subterráneo.
- Colocar alcantarillas por debajo de la elevación de la superficie de la pradera.

Figura 7.14 Opciones para cruce de una pradera inundada de un camino. (de Managing Roads for Wet Meadow Ecostream Recovery por Wm. Zeedyk, 1996)

RELLENO PERMEABLE CON ALCANTARILLAS

(Para avenidas altas periódicas en llanuras de inundación y praderas)



ENROCAMIENTO SIN ALCANTARILLAS (Para flujo mínimo superficial)

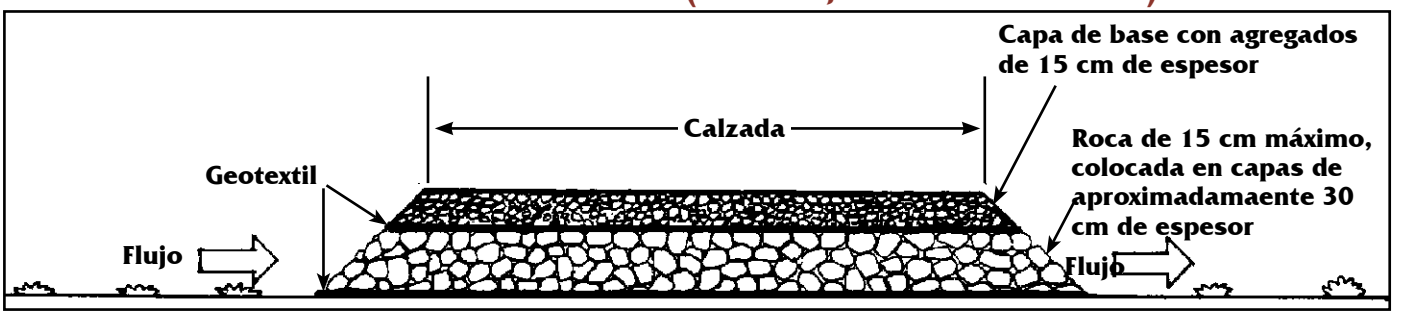
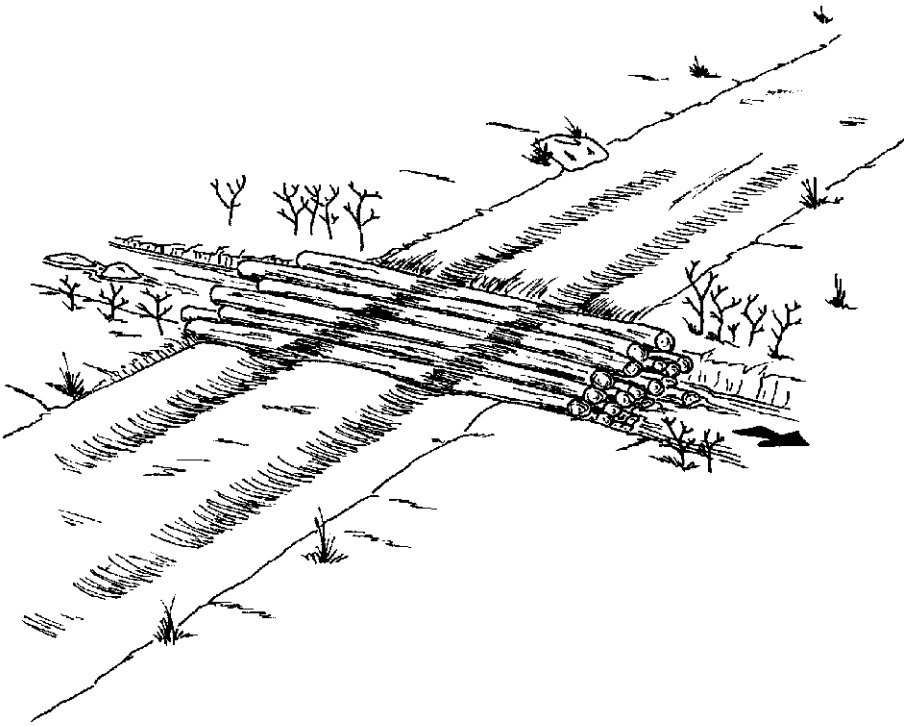


Figura 7.15 Vado de troncos, postes, o tubos de plástico para el cruce de humedales y pantanos. Los vados de postes se deben retirar inmediatamente después de haber terminado su uso, antes de que el extremo aguas arriba se tape con escombros e impida el paso del agua. (Adaptado de Vermont Department of Forests, Parks and Recreation, 1987)



Prácticas Recomendadas

Cruces de zonas inundadas y de praderas; subdrenaje

- Para el caso de cruces permanentes de praderas y de zonas inundadas, mantenga los patrones naturales de flujo del agua subterránea mediante el uso de tuberías múltiples colocadas al nivel de la pradera para diseminar cualquier escurrimiento superficial (véase la Foto 7.9). Alternativamente, se puede usar un relleno permeable de roca donde el escurrimiento superficial sea mínimo (véase la Figura 7.14).
- En zonas con lugares puntuales húmedos y tránsito limitado sobre el camino, refuerce la calzada con una capa de roca bien graduada o de suelo granular muy grueso de por lo menos 10 a 30 cm de espesor. Idealmente separe la roca gruesa del suelo saturado mediante una capa de filtro de geotextil o de grava.
- Para cruce temporal de drenajes inundados pequeños o de pantanos, construya un "camino de troncos" mediante capas de troncos colocados perpendicularmente al camino y cubiertos con una superficie de rodadura de suelo o grava.También se han usado tubos de PVC, esteras de aterrizaje, tablones de madera, capas de llantas y otros materiales (véase la Figura 7.15). Coloque una capa de geotextil entre el suelo saturado y los troncos o cualquier otro material usado para proporcionar apoyo adicional y para separar a los materiales. Retire los troncos de cualquier canal de drenaje natural antes de que empiece la temporada de lluvias (véase la Foto 8.8). Una capa de malla ciclónica de eslabones de cadena o de alambrado colocada bajo los troncos puede ayudar a facilitar el retiro de los troncos.
- En zonas con manantiales use obras de drenaje tales como subdrenes o capas de filtro permeables para eliminar el agua subterránea y para mantener seca la subrasante del camino (Figura 7.16, Foto 6.4 y Foto 7.10).
- Use subdrenes en el respaldo de estructuras de retención para evitar la saturación del relleno. Emplee subdrenes subterráneos o capas de filtro permeables por debajo de rellenos (terraplenes) colocados sobre manantiales o sobre humedales a fin de aislar el material de relleno y evitar la saturación y la potencial falla subsecuente del relleno.

Figura 7.16 Subdren típico para caminos usado para remover el agua subterránea .

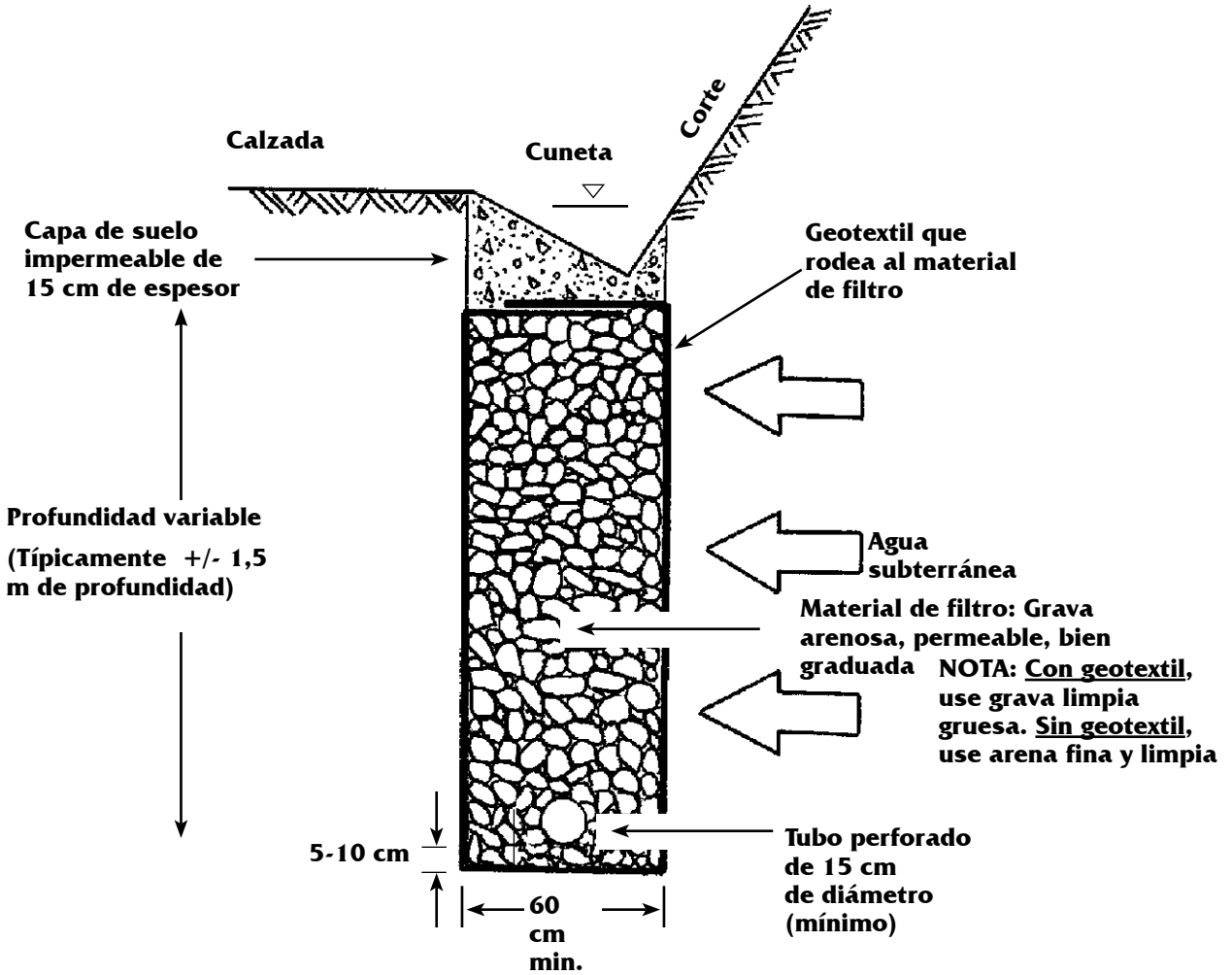


Foto 7.10 Utilice subdrenes o capas de filtro permeables cuando sea necesario, para eliminar el agua de la subrasante del camino en zonas de humedales o de manantiales.

Capítulo 8

Uso, Instalación y Dimensionamiento de Alcantarillas

"Asegúrese de que las alcantarillas tengan el tamaño adecuado o que tengan protección contra desbordamiento"

LAS ALCANTARILLAS SE USAN generalmente tanto como drenes transversales para desalojar el agua de cunetas, como para dejar pasar el agua por debajo de un camino en drenajes naturales y arroyos. Cualquiera que sea el caso, sus dimensiones se deben diseñar correctamente, se deben instalar adecuadamente y se deben proteger contra socavación (Foto 8.1). Los drenajes naturales necesitan contar con tubos de suficiente diámetro como para desalojar el flujo esperado más una capacidad adicional para evitar taparse con escombros (Foto 8.2). El paso de peces también debe considerarse en el diseño. La descarga (flujo de diseño) dependerá del área de drenaje de la cuenca de captación, de las características del escurrimiento, de la intensidad de la precipitación pluvial de diseño, y del periodo de retorno (frecuencia) de la tormenta de diseño. Para el diseño de alcantarillas típicamente se utiliza un evento mínimo de tormenta de 20 años y se puede diseñar aun para un evento con periodo de diseño de hasta 100 años (Foto 8.3), dependiendo de los reglamentos locales y de la sensibilidad del sitio (como puede ser el caso de especies en peligro de extinción).

Para cuencas de captación pequeñas (de hasta 120 hectáreas) el tamaño de la tubería se puede estimar a partir de la Tabla 8.1 (siempre que no se cuente con mejores datos locales). Para cuencas grandes, se deberán llevar a cabo análisis hidrológicos e hidráulicos específicos para cada sitio. En estos análisis se deberán tomar en cuenta las características de la cuenca de captación y del cauce, los niveles de aguas máximos, los datos de lluvia local, y otro tipo de información disponible sobre el flujo (véanse los Capítulos 5 y 6 y la parte de cruces de arroyos naturales del Capítulo 7).

Las alcantarillas se construyen normalmente de concreto o de metal (corrugado de acero o aluminio) y ocasionalmente se usa tubería de plástico, así como madera y mampostería. El

Foto 8.1 Proteja la salida de alcantarillas contra la erosión. El enrocamiento bien graduado puede utilizarse para este propósito.

Foto 8.2 Falla de una alcantarilla debido a una capacidad de flujo insuficiente o tamaño inadecuado del tubo para dejar pasar escombros (boleos) encontrados en el drenaje.

tipo de material por usar depende generalmente del costo y de la disponibilidad de los materiales. Sin embargo, el tubo metálico corrugado (CMP, por sus siglas en inglés) y el tubo de concreto son normalmente más durables que el tubo de plástico. La geometría de la alcantarilla, como puede ser un tubo de sección circular, una tubería en arco, un arco estructural o una caja, dependerá del sitio, del claro por cubrir, y del espesor permisible de la cubierta de suelo. Los factores claves para la selección de alcantarillas son una adecuada capacidad de flujo, que la alcantarilla sea adecuada al sitio y a la necesidad, y que la instalación sea costo-efectiva.

Las opciones y detalles de instalación de alcantarillas de drenaje transversal se observan en la Figura 8.1, así como en las Figuras 7.6 y 7.7 anteriores. El tubo de drenaje transversal se debería colocar idealmente en el fondo del relleno, la entrada se debería proteger con una estructura de boca de caída o cuenca de captación, y la zona de descarga se debería proteger contra la socavación.

Los factores de instalación y alineación de alcantarillas se muestran en las Figuras 8.2 a 8.5. Entre los detalles importantes de instalación se incluyen los siguientes: minimización de modificaciones al cauce; evitar constricciones del ancho del canal de flujo con el caudal máximo; mantenimiento de la pendiente y alineación naturales; utilización de materiales de calidad y bien compactados para apoyo y para relleno; y empleo de medidas de protección para la entrada, salida y márgenes del arroyo (Foto 8.4). Las rejillas (véase la Figura 8.6) son con frecuencia deseables en cauces con cantidades importantes de escombros a fin de evitar el taponamiento (Foto 8.5).

El material para apoyo y para relleno de alcantarillas se especifica comúnmente como "material granular seleccionado" o como "suelo mineral seleccionado". De hecho, muchos suelos son satisfactorios siempre que estén exentos de humedad en exceso, de escombros, de terrones de suelo congelado o de arcilla altamente plástica, de raíces o de fragmentos de roca de más de 7,5 cm de tamaño. El material de apoyo por debajo del tubo no debe contener rocas de más de

Foto 8.3 Instale alcantarillas de mampostería, de cajones de concreto o de metal, con un tamaño (capacidad) lo suficientemente grande para pasar con seguridad el caudal o flujo de diseño anticipado, con escombros, de diseño anticipada (típicamente par un periodo de recurrencia de 20 a 50 años), con base en un análisis hidrológico. Use muros de cabeza o de alero siempre que sea posible.

3,8 cm de tamaño. Se podrá usar suelo arcilloso siempre que se compacte cuidadosamente con un contenido de humedad uniforme cercano al óptimo. **El material ideal para relleno es un suelo granular bien graduado o una mezcla de grava y arena bien graduada con no más del 10% de finos y libre de fragmentos de roca.** El material deberá compactarse perfectamente, cuando menos para que sea tan denso como el terreno adyacente, y de preferencia hasta alcanzar una densidad de 90-95% de la máxima densidad AASHTO T-99, y se colocará en capas de 15 cm de espesor. Es importante tener un relleno denso y uniforme compacto para soportar estructuralmente el empuje lateral transmitido por el tubo, particularmente con tuberías plásticas.

La arena fina uniforme y los suelos limosos pueden resultar problemáticos cuando se usan como material de apoyo o de relleno para alcantarillas. Estos suelos finos no cohesivos son muy susceptibles a la socavación y a la tubificación producida por el agua en movimiento (Foto 8.6). Es por ello que su uso no se recomienda. En caso de usarlos, deben compactarse perfectamente contra el tubo. Idealmente, los collares contra filtraciones hechos de metal, concreto o incluso geotextiles, deberán colocarse alrededor del tubo de alcantarilla para forzar a cualquier cauce de agua a fluir a lo largo de una trayectoria más larga a través del suelo. Con los muros de cabeza de concreto también se impide la tubificación.

Debido a las condiciones cambiantes del clima, escombros y arrastres en canales, al cambio en los patrones de uso del suelo, y a las incertidumbres en las estimaciones hidrológicas, la capacidad y el tamaño de las alcantarillas deberá ser suficiente y en general estas características deberán estar en exceso y no en defecto. Idealmente una alcantarilla tendrá un ancho equivalente al ancho del cauce natural para evitar la constricción del canal. La protección del cauce, el enrocamiento de protección, los drenes de desbordamiento, los muros de cabeza y las rejillas pueden en general mitigar los problemas

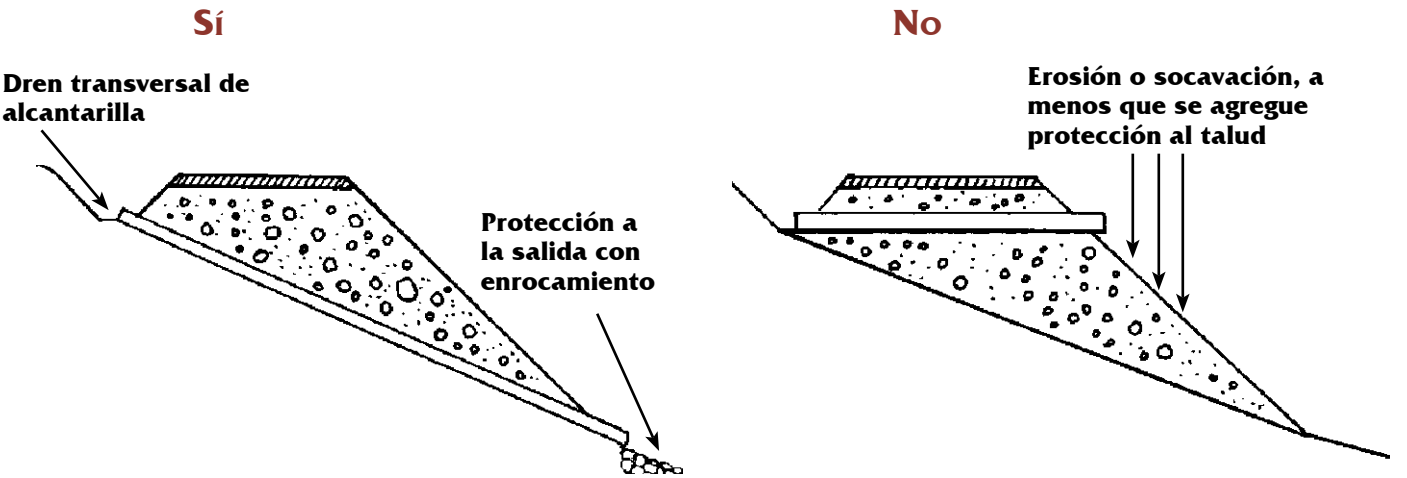
Tabla 8.1

Dimensionamiento de la Estructura de Drenaje				
Área de drenaje (Cuenca) (Hectáreas)	**Tamaño de la estructura de drenaje Pulgadas y Área (m²)**			
	Taludes empinados Cubierta con vegetación ligera C= 0,7		**Taludes suaves Cubierta con vegetación densa C=0,2**	
	Tubo circular (in)	Área (m²)	Tubo circular (in)	Área (m²)
0-4	30"	0,46	18"	0,17
4-8	42"	0,89	24"	0,29
8-15	48"	1,17	30"	0,46
15-30	72"	2,61	42"	0,89
30-50	84"	3,58	48"	1,17
50-80	96"	4,67	60"	1,82
80-120			72"	2,61
120-180			84"	3,58

Notas: Si el diámetro del tubo no está disponible, use el tamaño más grande siguiente para el área de drenaje considerada. Para terreno intermedio, interpole entre los tamaños del tubo.

- **El tamaño del tubo se basa en el Método Racional y en las curvas de Capacidad de Alcantarillas. Se asume una intensidad de lluvia de 75 mm/h (3"/h) a 100 mm/h (4"/h). Los valores de "C" corresponden a los Coeficientes de Escorrentía para el terreno.**
- **Para regiones tropicales con lluvias intensas frecuentes (más de 250 mm/h), estas áreas de drenaje para cada tamaño del tubo deben reducirse al menos por la mitad.**

Figura 8.1 Opciones para la instalación de un dren transversal de alcantarilla en un relleno.



La boca de salida del tubo deberá sobresalir con respecto al pie del relleno y nunca deberá descargar en el talud del terraplén, a menos de que éste cuente con proteción contra la erosión.

Si se usa este tipo de diseño, es necesario colocar un tubo de drenaje de bajada o canal revestido (al final) sobre todo en grandes rellenos con suelos pobres y en zonas de alta precipitación pluvial, en donde el asentamiento del relleno puede requerir reparaciones de la alcantarilla.

en alcantarillas, pero ninguno de ellos será tan bueno como un tubo del tamaño adecuado bien colocado. Para evitar reparaciones al tubo o incluso su falla, así como para prevenir daños ambientales, una alcantarilla sobrediseñada pueden ser a la larga más costo-efectivo. Por otro lado, la colocación de muros de cabeza de concreto o de mampostería ayudan a disminuirla posibilidad de obstrucción y falla de la tubería.

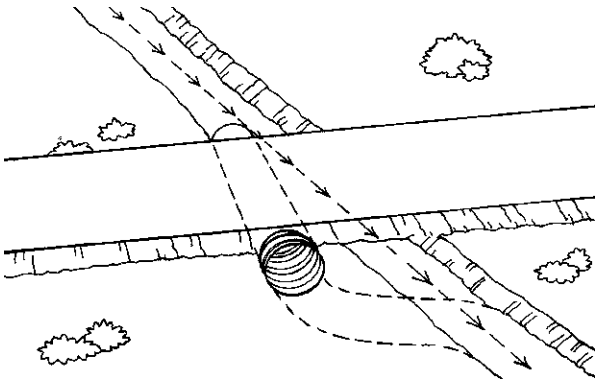
El tamaño del tubo, como función del caudal de diseño (capacidad) y del tirante río arriba, se

Foto 8.4 Alcantarilla tipo arco con placa estructural, con protección de las márgenes del arroyo a base de enrocamiento de gran tamaño, colocado sobre una capa de filtro de geotextil.

Figura 8.2 Alineación de la alcantarilla y detalles de instalación (continua en la página siguiente).

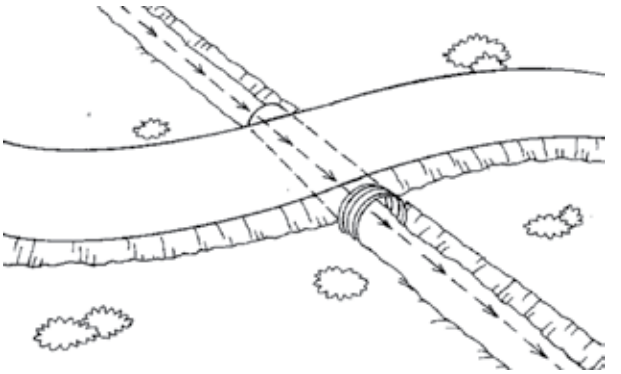
a. Opciones para la alineación de la alcantarilla.

Pobre



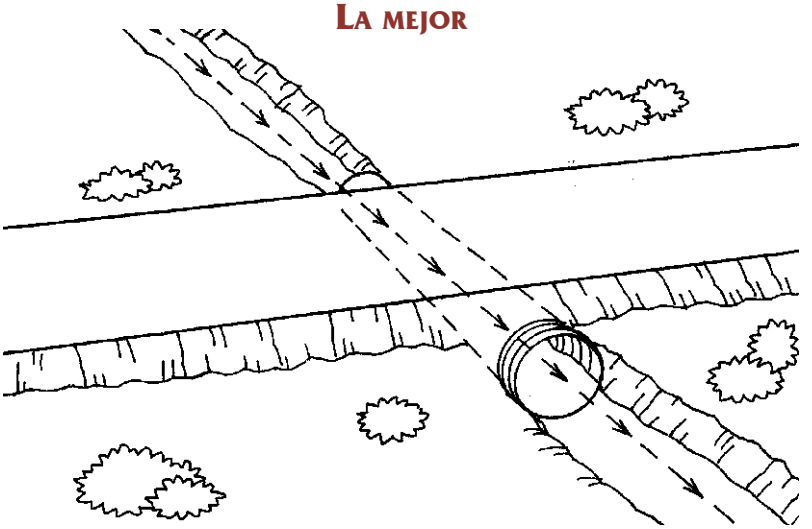
Implica la modificación del cauce del arroyo.

Adecuado



No hay modificaciones al cauce, pero requiere una curva en el camino.

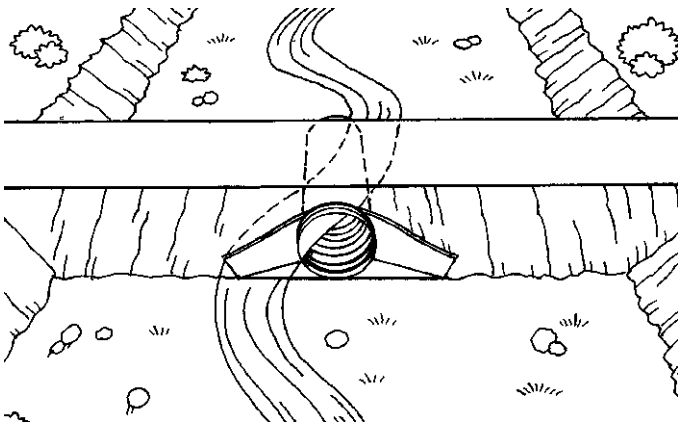
La mejor



No hay modificaciones al cauce y el camino es perpendicular a la alcantarilla sin una curva en el alineamiento del camino.

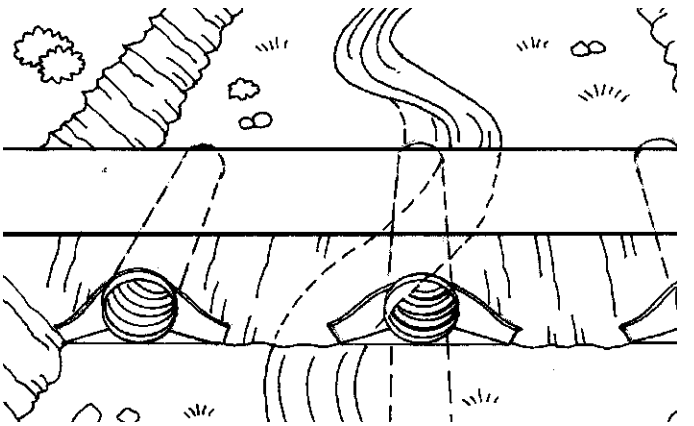
b. Instalación de alcantarillas dentro de un cauce amplio.

Pobre



En un solo tubo se concentra el flujo del canal amplio o de la llanura de inundación.

Mejor



Los tubos múltiples dispersan el flujo a través del cauce. El tubo del centro puede colocarse ligeramente más abajo, para desalojar el flujo normal en estiaje y promover la migración de peces.

Figura 8.2 (continuación)

c. Instalación de alcantarillas al nivel del lecho del arroyo.

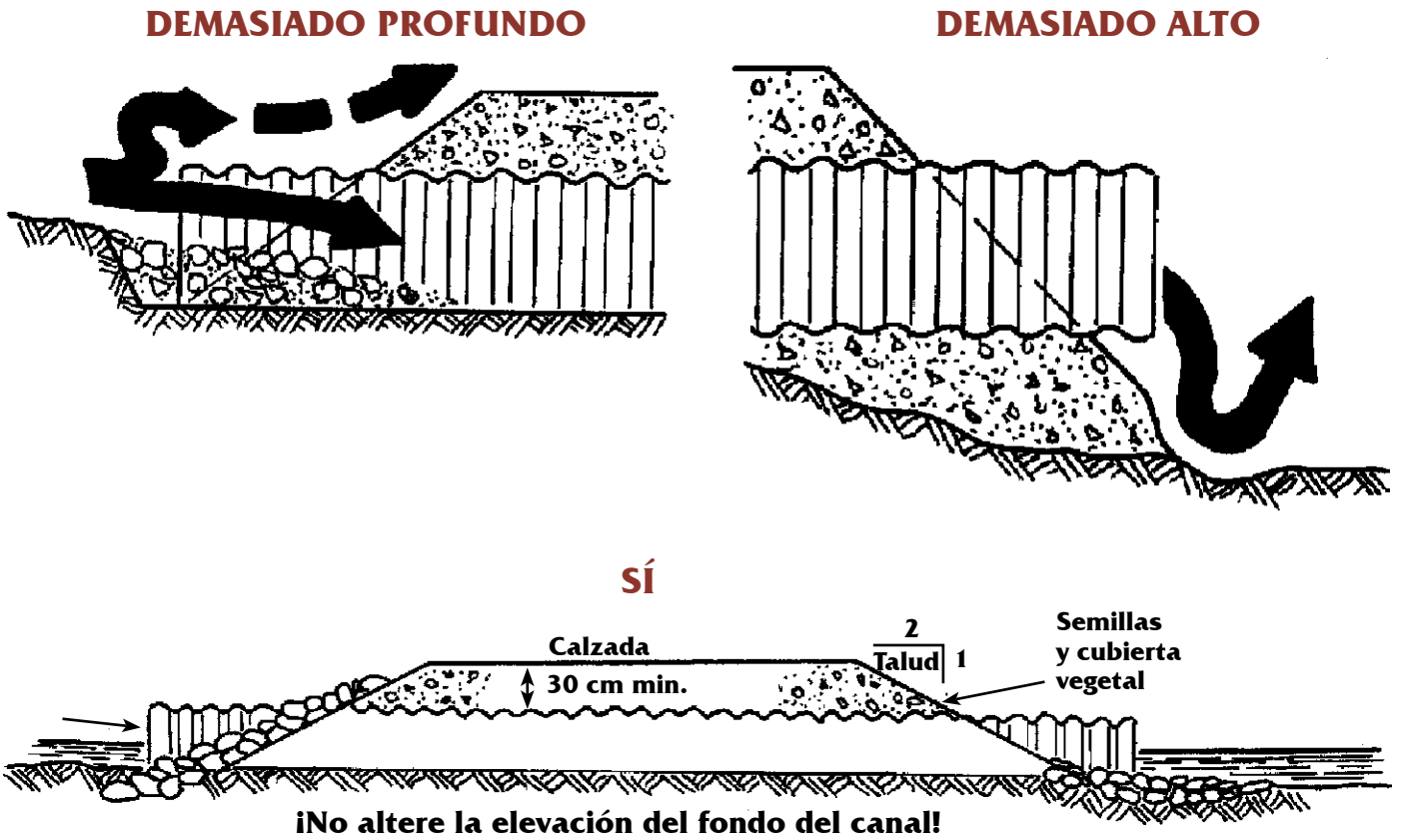


Figura 8.3 Relleno y compactación de un alcantarilla. (Adaptado de Montana Department of State Lands, 1992)

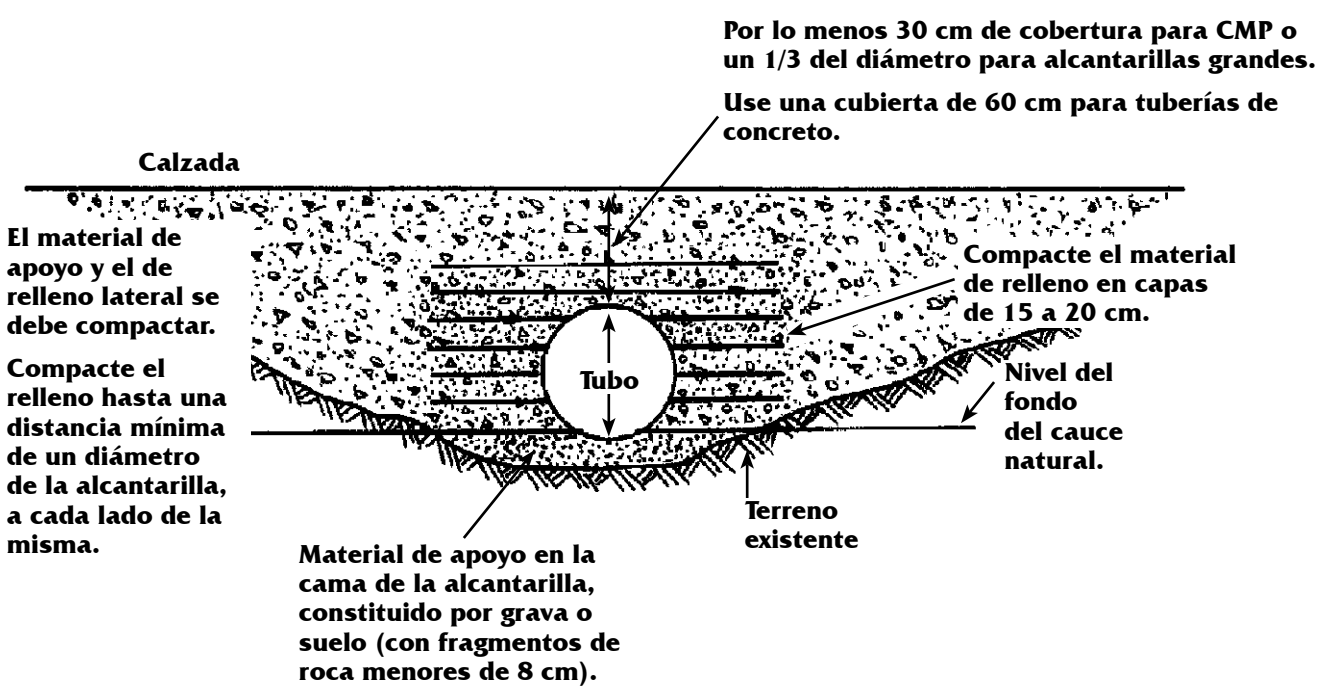
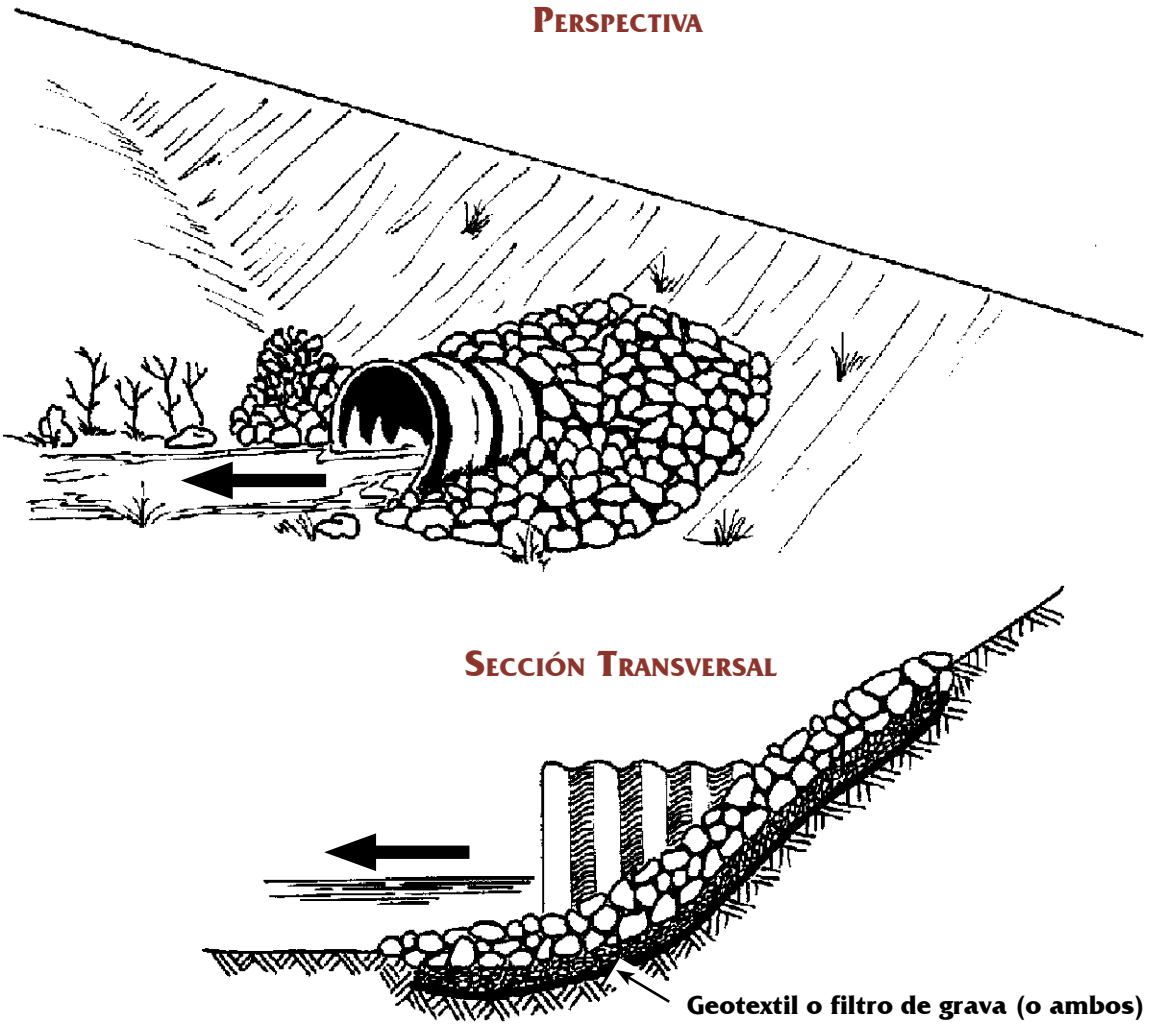
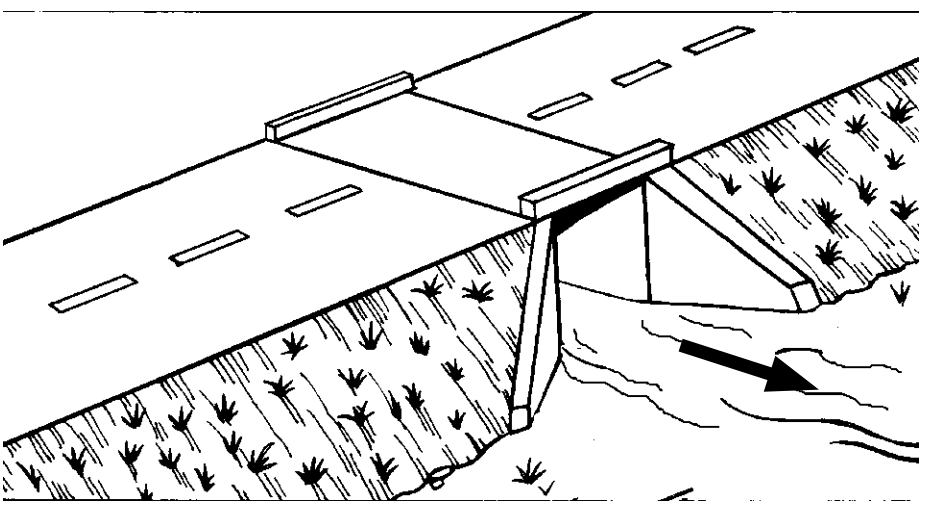


Figura 8.4 Protección a la entrada y salida de las alcantarillas.

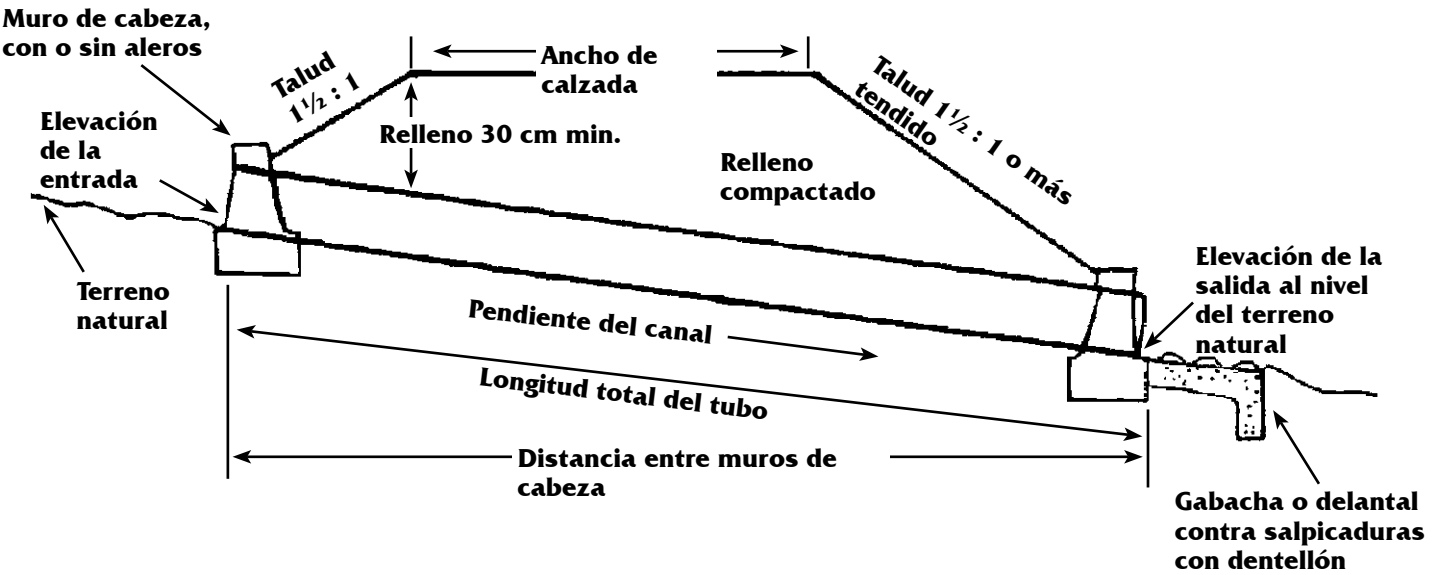


a. Instalación normal de alcantarillas de metal usando enrocamiento alrededor de la entrada y de la salida. Se usan también geotextiles (tela de filtro) o filtros de grava por debajo del enrocameinto en la mayoría de las instalaciones . (Adaptado de Wisconsin's Forestry Best Management Practice for Water Quality, 1995)

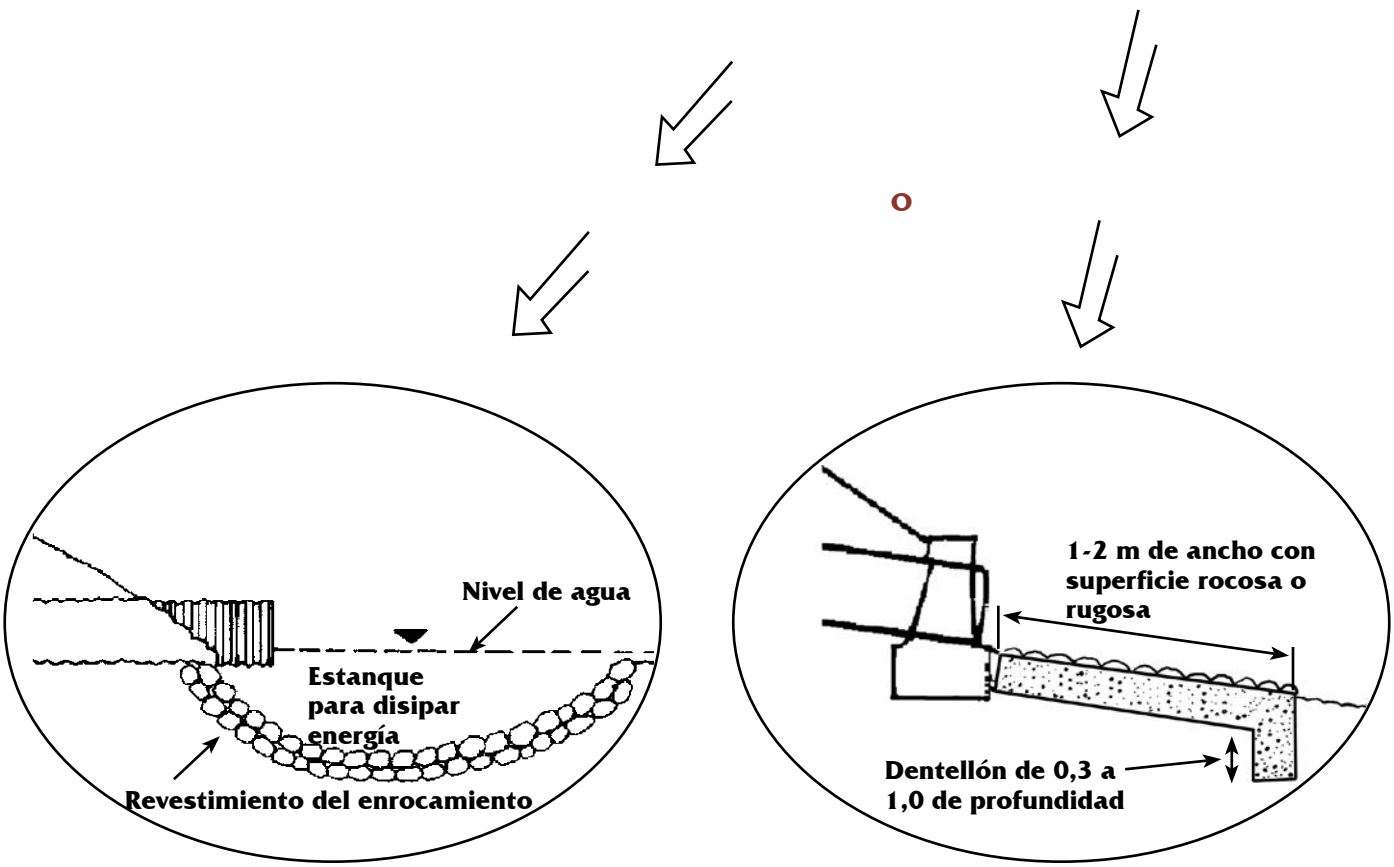


b. Alcantarilla de cajón de concreto con muros de alero de concreto para protección de la entrada y de la salida, así como para la contención del relleno.

Figura 8.5 Instalación de alcantarillas y detalles de protección de la boca de salida, con vertedores contra salpicaduras o con tanque amortiguador revestido de enrocamiento.



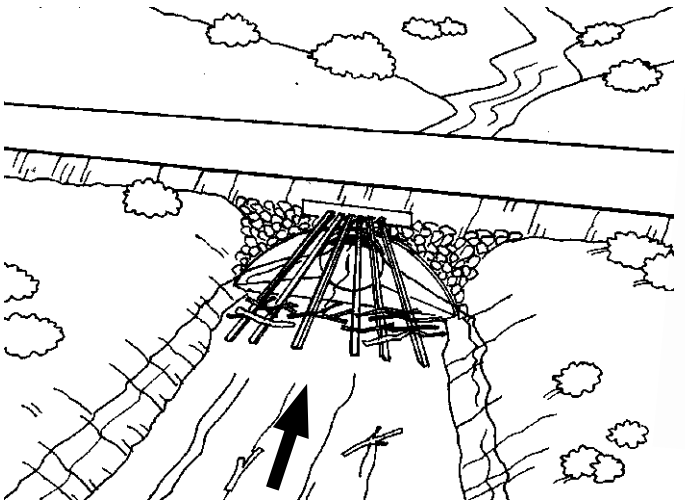
Instalación típica de una alcantarilla con muros de cabeza y vertedor contra salpicaduras o con tanque amortiguador revestido con enrocamiento, para disipación de la energía y control de la socavación.



Detalle de la salida con enrocamiento y con tanque amortiguador

Detalle de gabacha contra salpicaduras con dentellón impermeable contra la socavación

Figura 8.6 Opciones de rejilla en alcantarillas para evitar el taponameinto con escombros. Observe que algunas rejillas están ubicadas en el tubo y otras se localizan aguas arriba del tubo, dependiendo de las condiciones locales y del acceso para limpieza y mantenimiento.



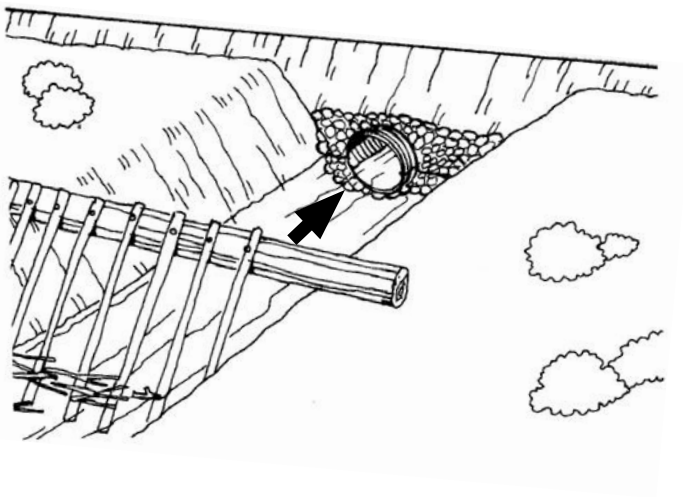


Foto 8.5 Use rejillas en las alcantarillas donde exista la posibilidad de una gran cantidad de escombros en el cauce. Recuerde que las rejillas necesitan limpiarse y darles mantenimiento.

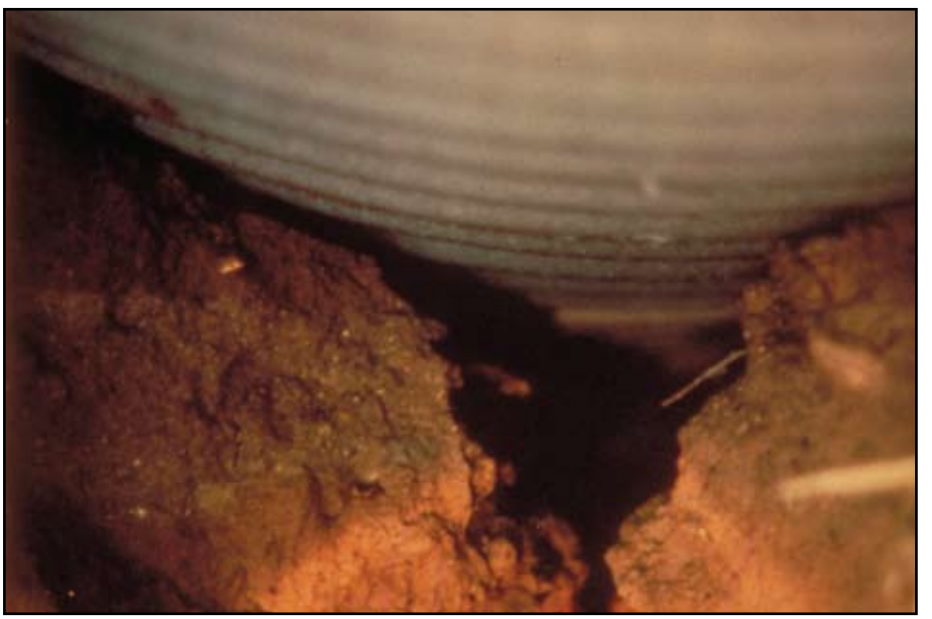
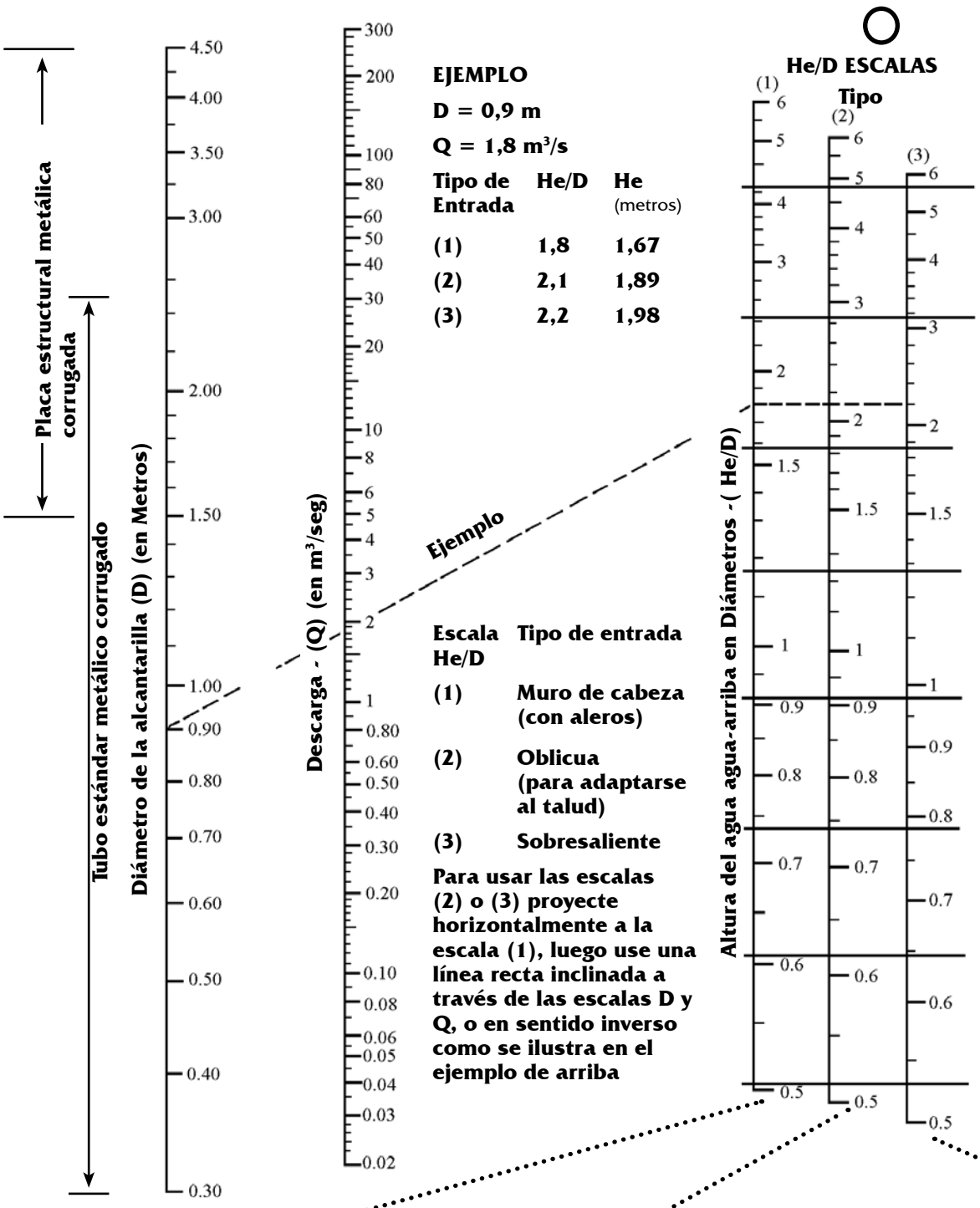
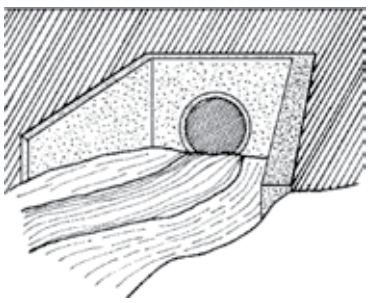


Foto 8.6 Puede presentarse tubificación por debajo de una alcantarilla instalada incorrectamente, lo que dará lugar a una falla. Evite el uso de arena fina y de limo como materiales de apoyo y de relleno y asegurese de que el material esté bien compactado.

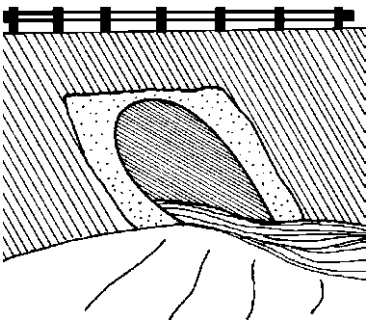
Figura 8.7a Nivel del agua agua-arriba (He) y capacidad para ALCANTARILLAS DE TUBO METÁLICO CORRUGADO, con control a la entrada (sistemá métrico). (Adaptado de FHWA, HDS 5, 1998)



Muro de cabeza con muros de alero (Tipo 1)



Oblicua (Tipo 2)



Sobresaliendo del terraplén (Tipo 3)

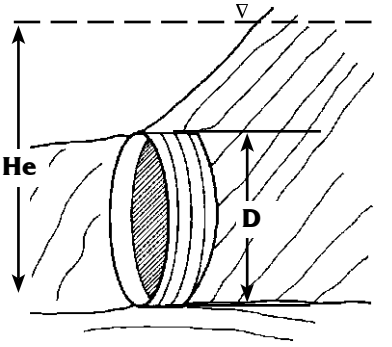


Figura 8.7b Nivel del agua agua-arriba (He) y capacidad para ALCANTARILLAS DE TUBO DE CONCRETO con control a la entrada. (Adaptado de FHWA, HDS 5, 1998)

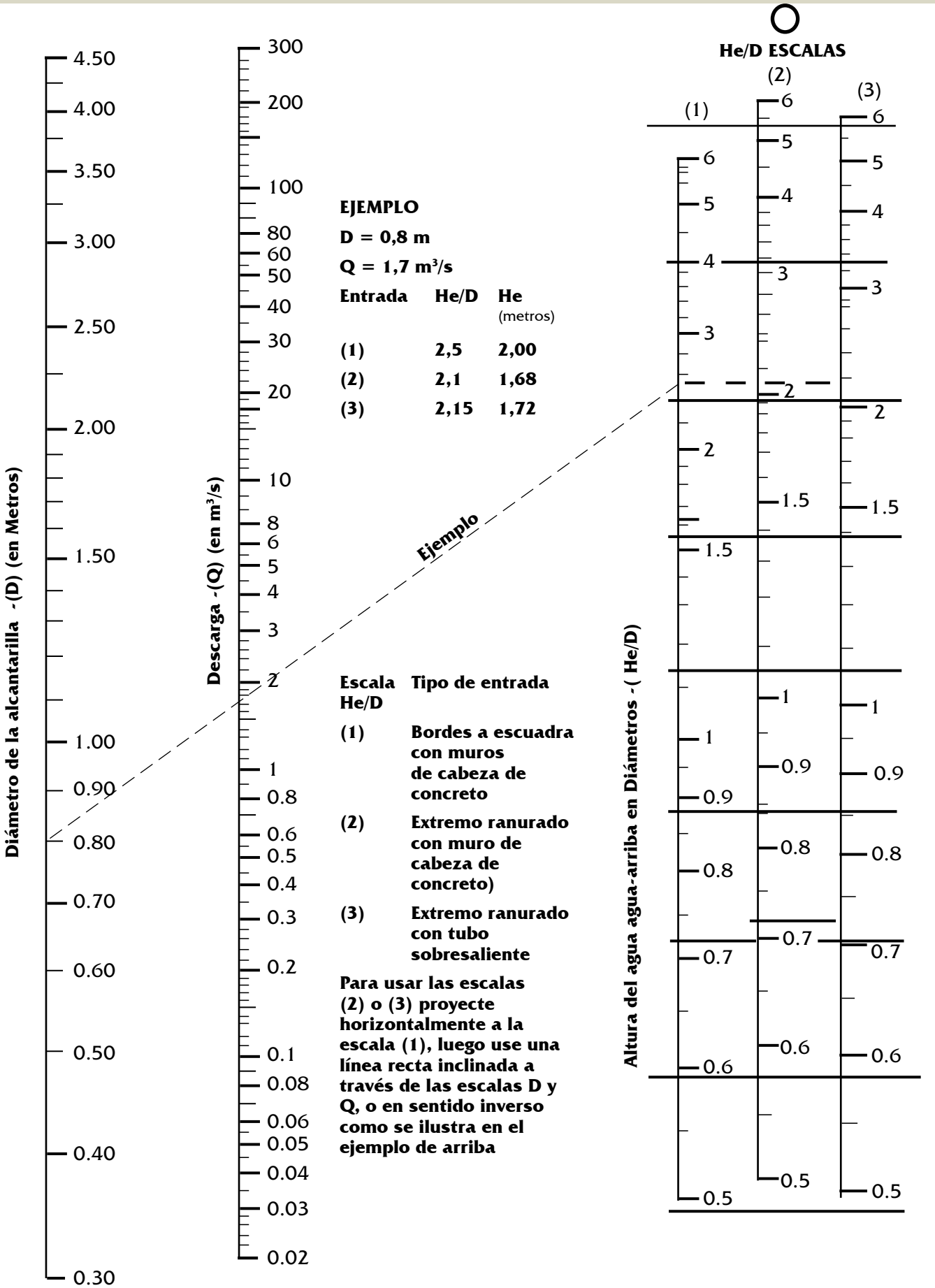
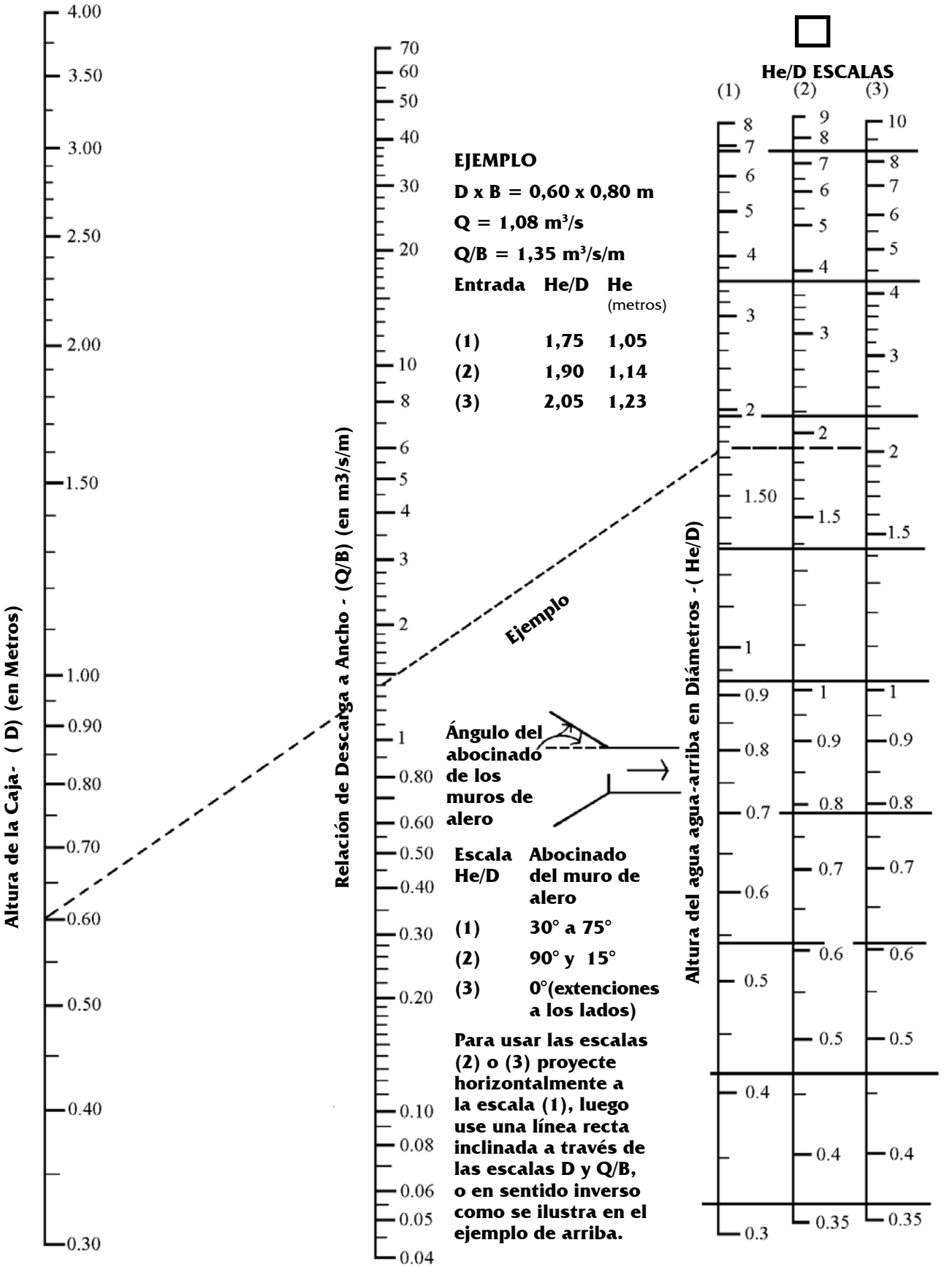


Figura 8.7c Nivel del agua agua-arriba (He) y capacidad par ALCANTARILLAS DE CAJONES DE CONCRETO con control a la entrada. (Adaptado de FHWA, HDS5, 1998)



Prácticas Recomendadas

Drenes transversales de Alcantarillas (para aliviar cunetas)

- Los tubos de drenaje transversal para vaciar cunetas deberían tener típicamente un diámetro de 45 cm (diámetro mínimo de 30 cm). En zonas con escombros, con taludes de corte inestables y con problemas de desmoronamientos, usar tubos de 60 cm de diámetro o mayor.
- La pendiente del tubo de drenaje transversal para drenar las cunetas debe ser de por lo menos 2% o mayor (más inclinada) que la pendiente de la cuneta y esviajada entre 0 y 30 grados perpendicular al camino (véase la Figura 7.4). Esta inclinación adicional ayuda a evitar que el tubo se tapone con los sedimentos.
- Los drenes transversales de alivio de cunetas deberán descargar al pie del terraplén cerca del nivel del terreno natural, cuando menos a una distancia de 0,5 metros hacia fuera del pie del talud del terraplén. Acorazar la boca de salida del tubo (véanse las Figuras 7.6 y 7.7 anteriores y Figura 8.1). No descargar el tubo sobre material de relleno desprotegido, en taludes inestables o directamente en los arroyos (véase la Foto 8.1 vs Foto 8.9).
- En rellenos grandes se podrán necesitar drenes de bajada de alcantarilla para transportar el agua hasta el pie del talud del relleno (Figura 8.1). Anclar los drenes de bajada al talud mediante varillas metálicas, bloques de anclaje de concreto, o cables. Se pueden usar tubos, canalones o cunetas revestidas.

Alcantarillas en drenajes naturales

- Instalar alcantarillas permanentes con un tamaño lo suficientemente grande como para desalojar las avenidas de diseño más los escombros que se puedan anticipar. Por lo general, diseñar para eventos de tormenta de 20 a 50 años. Los arroyos sensibles pueden necesitar diseños para descargar avenidas con periodos de retorno de 100 años. El tamaño de la tubería se deberá determinar usando criterios de diseño reales, tales como los de la Tabla 8.1, o los que estén basados en análisis hidrológicos específicos para el sitio.
- Tomar en cuenta los impactos de cualquiera de las estructuras en el paso de peces y en el ambiente acuático. Idealmente seleccionar una estructura como puede ser un puente o una alcantarilla de arco sin fondo que sea tan ancha como el ancho correspondiente al nivel de aguas máximas ordinarias (ancho con el caudal máximo) que minimice la alteración del cauce y que mantenga el material de fondo del canal natural (Foto 8.7).
- Colocar los cruces de caminos sobre drenajes naturales perpendiculares a la dirección del drenaje a fin de minimizar la longitud del tubo y el área afectada (Figura 8.2a).
- Usar tubos individuales de gran diámetro o un cajón de concreto en vez de varios tubos de menor diámetro para minimizar el potencial de taponamiento en la mayoría de los canales (a menos que la elevación de la calzada sea crítica). En cauces muy anchos los tubos múltiples son más recomendables para mantener la distribución del flujo natural a través del canal (Figura 8.2b).
- Para sitios con altura limitada, usar "tubos aplastados" o tubos de sección en arco que maximizan la capacidad al mismo tiempo que minimizan la altura.
- Instalar alcantarillas lo suficientemente largas de tal forma que ambos extremos de la alcantarilla sobrepasen el pie del relleno del camino (Figura 8.2c) (Foto 8.9). Alternativamente, usar muros de contención (muros de cabeza) para soportar el talud del terraplén (Figura 8.5 y Foto 8.8).
- Usar muros de cabeza de concreto o de mampostería en los tubos de alcantarilla con tanta frecuencia como sea posible. Entre las ventajas de los muros de cabeza de mampostería en tubos de alcantarilla se incluyen las siguientes: evitar que los tubos grandes emerjan del terreno cuando se obturan; reducir la longitud del tubo; aumentar la capacidad del tubo; ayudar a eliminar los escombros a lo largo del tubo; retener el material de relleno; y disminuir las posibilidades de falla de la alcantarilla en caso de desbordamiento (Foto 8.8).
- Colocar alineadas las alcantarillas sobre el fondo y en la parte media del cauce natural de tal manera que la instalación no afecte la alineación del canal del arroyo ni la elevación del fondo del cauce. Las alcantari-

Prácticas Recomendadas

llas no deberán causar represamiento ni estancamiento de agua, ni tampoco deben aumentar significativamente las velocidades de la corriente (Figura 8.2).

- Compactar firmemente material de relleno bien graduado alrededor de las alcantarillas, sobre todo alrededor de la mitad inferior, colocando el material en capas para alcanzar un peso volumétrico uniforme (Figura 8.3). Idealmente usar grava arenosa ligeramente plástica con finos. Evitar el uso de arena fina y de suelos con abundante limo como materiales de apoyo debido a su susceptibilidad a la tubificación. Poner particular atención en el material de apoyo de la alcantarilla y en la compactación del mismo alrededor de los costados del tubo. No permitir que la compactación desplace o levante el tubo. En rellenos grandes, permitir el asentamiento al instalar el tubo con un cierto bombeo.
- Cubrir la parte superior de tubos de metal y de plástico de alcantarillas con material de relleno hasta una profundidad de cuando menos 30 cm para evitar el aplastamiento del tubo al paso de camiones pesados. Usar una cubierta mínima de 60 cm de relleno sobre la tubería de concreto (Figura 8.3). Para rellenos de gran altura, seguir las recomendaciones del fabricante.
- Usar enrocamiento de protección, secciones metálicas terminales abocinadas o muros de cabeza o de remate ya sea de mampostería o de concreto alrededor de las bocatomas y de salida de las alcantarillas a fin de evitar que el agua erosione el relleno y socave el tubo, así como para mejorar la eficiencia del tubo. Para el enrocamiento, usar pequeños fragmentos de roca bien graduados, grava o un filtro de geotextil colocados bajo la protección de enrocamiento grueso del talud (Figura 8.4).
- En las bocas de salida de las alcantarillas donde se aceleran las velocidades de flujo por el tubo, proteger el canal ya sea con un tanque amortiguador (en pendientes suaves), con acorazamiento de roca (enrocamiento) o con un vertedero de protección que tenga una superficie entrante rugosa o de roca y un dentellón de anclaje (Figura 8.5).
- En los tubos existentes susceptibles a taponarse, agregar una rejilla aguas arriba del tubo o a la entrada del tubo bocatoma para detener a los escombros antes de que obturen el tubo (Figura 8.6 y Foto 8.5). Se pueden construir las rejillas con troncos, tubos, varillas corrugadas, perfiles de ángulo, rieles de ferrocarril, pilotes de sección H, etc. Sin embargo, las rejillas en general implican mantenimiento y limpieza adicional por lo que no se recomiendan si otras alternativas, tales como la instalación de un tubo de gran diámetro, están disponibles.
- Examinar los cauces de los arroyos en busca de escombros, troncos y vegetación tipo maleza. En canales con grandes cantidades de escombros considerar el uso de **vados** con caudales en estiaje, tubos de gran tamaño o la colocación de una rejilla aguas arriba de la bocatoma del tubo.
- Instalar vados de desbordamiento a un lado de la alcantarilla en canales de drenaje con un gran relleno que pudiera ser desbordado. Usar también **vados de desbordamiento** en pendientes largas sostenidas de caminos, en los que una alcantarilla tapada podría desviar el agua hacia abajo del camino, obstruyendo las alcantarillas subsecuentes y causando daños importantes fuera del sitio (Figura 7.11 del Capítulo 7).
- Las alcantarillas provisionales de troncos (alcantarillas tipo "Humboldt") generalmente cuentan con una muy baja capacidad de flujo. Cuando se usen, asegurarse de que la estructura y todo el material de relleno sean extraídos del canal antes de la temporada de lluvias o de grandes avenidas pronosticadas (Foto 8.10).
- Realizar mantenimiento periódico y limpieza del canal, a fin de conservar las alcantarillas protegidas y libres de escombros que pudieran tapar el tubo.

Prácticas Que Deben Evitarse

- Descargar los tubos de drenaje transversal sobre el talud de un terraplén a menos que el talud esté protegido o que se use un dren de bajada.
- Usar tubos de menor tamaño que el necesario para el flujo esperado y para la cantidad de escombros.
- Usar arenas finas no cohesivas y materiales limosos para apoyo, que sean muy susceptibles a la tubificación.
- Instalar tubos demasiado cortos como para adaptarse al sitio.
- Colocar tubos enterrados o alineados de manera incorrecta con respecto al cauce natural.
- Dejar en su lugar las estructuras provisionales de baja capacidad para cruce de drenajes durante toda la temporada de lluvias.

Foto 8.7 Use estructuras con el cauce natural como fondo, tales como arcos sin fondo, alcantarillas de cajones de concreto o tuberías en arco colocadas por debajo de la elevación del fondo del arroyo, para promover la migración de peces y minimizar los impactos al arroyo.

Foto 8.8 Instale alcantarillas con capacidad suficiente y con muros de cabeza para mejorar la capacidad de la alcantarilla, proteger el relleno de la calzada y evitar la socavación de las márgenes, sobre todo en un meandro o curva del canal.

puede determinar fácilmente mediante el uso de los nomogramas presentados en las Figuras 8.7a, 8.7b y 8.7c. Estas figuras son válidas para alcantarillas que se construyen comúnmente a base de tubos de metal corrugados, tubos de concreto de sección circular, y cajas de concreto. Cada una de estas figuras se aplica a tubos con control a la entrada, donde no hay restricciones en el tirante aguas abajo que sale de la estructura. Idealmente, la elevación del agua a la entrada (tirante río arriba) no debería exceder demasiado a la altura, o diámetro de la estructura, a fin de evitar la saturación del relleno y de minimizar la probabilidad de taponamiento del tubo con los escombros flotantes.

Información detallada de este tema puede encontrarse en *FHWA (Manual HDS-5, Hydraulic Design of Highway Culverts, 1998)*.

Foto 8.9 Evite colocar bocas de salidad de alcantarillas en la parte media de un talud de terraplén. Use alcantarillas lo suficientemente largas para sobresalir del pie del talud del terraplén, o use estructuras de muros de cabeza para retener el material de relleno y minimizar la longitud del tubo.

Foto 8.10 La mayoría de las alcantarillas de troncos tienen una capacidad de flujo muy limitada. Retire las alcantarillas provisionales de troncos (Tipo Humboldt) antes de tormentas fuertes o de la temporada de lluvias.

Capítulo 9

Vados o Cruces en Estiaje

"Mantenga el perfil del vado bajo, arme la superficie de rodadura y proteja contra la socavación"

LOS VADOS, CRUCES EN ESTIAJE, O BADENES como se les suele llamar, pueden ofrecer una alternativa satisfactoria al uso de alcantarillas y de puentes para el cruce de arroyos en caminos de bajo volumen de tránsito en los que el uso de la vía y las condiciones de flujo del arroyo sean las adecuadas. Al igual que en el caso de otras estructuras hidráulicas, para cruzar arroyos, para los vados se necesitan conocer las características específicas del sitio y realizar análisis particulares hidrológicos, hidráulicos y bióticos. Idealmente se deben construir en lugares estrechos a lo largo del arroyo y deben ubicarse en una zona subyacida por roca sana o por suelo grueso para lograr buenas condiciones de cimentación. Un vado puede ser angosto o ancho, pero no debe usarse en drenajes de gran profundidad que implican rellenos altos o accesos carreteros excesivamente inclinados.

Los cruces en estiaje pueden tener como superficie de rodadura una simple capa de enrocamiento de protección, roca dura (acorazamiento) o contar con una superficie mejorada formada por gaviones o por una losa de concreto, como se observa en la Figura 9.1a y Foto 9.1. En los vados con alcantarillas o mejorados se combina el uso de tubos de alcantarilla o de alcantarillas de cajón para desalojar flujos en estiaje con una superficie de rodadura reforzada encima de las alcantarillas para soportar el tránsito y evitar que los vehículos circulen por el agua, como se observa en las Figuras 9.1 b y c. La superficie de rodadura reforzada por encima de los tubos también resiste la erosión durante el desbordamiento al paso de altos caudales de agua (Foto 9.2). Todo el perímetro mojado de la estructura debería protegerse hasta un nivel por encima de la elevación de aguas máximas anticipada.

Entre los factores clave que se deben tomar en cuenta para el diseño y ubicación de un vado, se incluyen los siguientes: niveles mínimos y máximos de agua de diseño; condiciones de la cimen-

Foto 9.1 Use cruces revestidos para temporadas de estiaje o vados con la mayor frecuencia posible, para cruzar caudales bajos en desagües naturales anchos y poco profundos para evitar el uso de tubos. Note que la superficie de este cruce requiere reparación.

Foto 9.2 Un vado con alcantarillas, usando tubos múltiples de alcantarillas para desalojar el flujo a través de los mismos y mantener a los vehículos fuera del agua, pero que dejan pasar sobre toda la estructura los flujos grandes y los escombros.

tación; potencial de socavación; retrasos permitidos en el tránsito; geometría de la sección transversal del cauce y confinamiento; protección del borde aguas abajo de la estructura contra socavación local; estabilidad del cauce y de las márgenes del arroyo; materiales de construcción disponibles localmente; y control de la pendiente para la migración de peces.

Para la migración de peces o especies acuáticas, debe mantenerse un fondo del canal de flujo natural o rugoso y la velocidad del agua no debe ser acelerada. Las estructuras ideales son los vados con alcantarillas y un fondo de cauce natural (ver Foto 9.5) o un vado mejorado con una superficie de rodadura reforzada y rugosa (Figura 9.1 a).

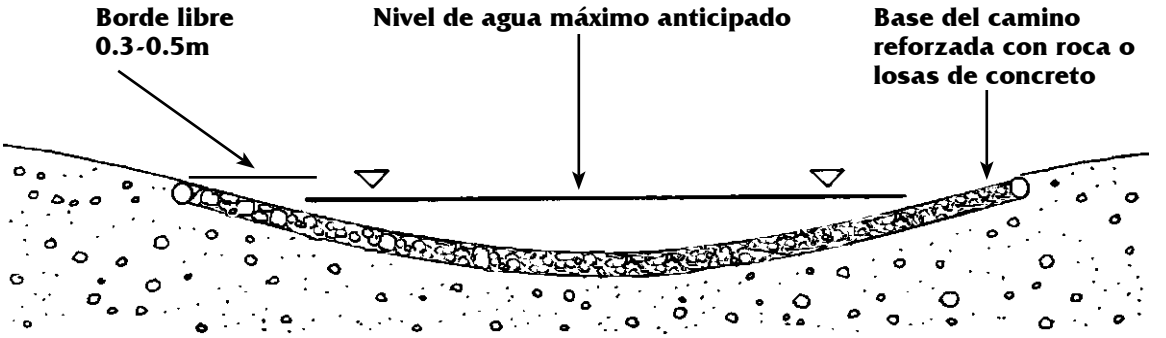
Ventajas de los Vados

- La ventaja principal es que un vado no es generalmente susceptible a obstruirse con escombros o con vegetación como sucede en el caso de una alcantarilla de tubo que puede llegar a taparse.
- En general los vados son estructuras menos costosas que las alcantarillas grandes o los puentes. Pueden resultar inicialmente más costosos que las alcantarillas, pero se necesitará menos relleno en el cauce y pueden dejar pasar un mayor caudal.
- Los vados con alcantarillas se pueden usar para desalojar flujos en estiaje y para mantener a los vehículos fuera del agua, evitando la degradación de la calidad del agua.
- La estructura se puede diseñar como un cimacio de cresta ancha que puede dejar pasar un gran caudal de agua sobre la parte superior del vado. No es muy sensible a caudales específicos debido a que un pequeño aumento en el tirante de agua incrementa de manera importante la capacidad. Los vados pueden ser más "indulgentes" y pueden permitir más incertidumbres en el caudal de diseño, por lo que son ideales como obras de drenaje con características desconocidas de flujo.

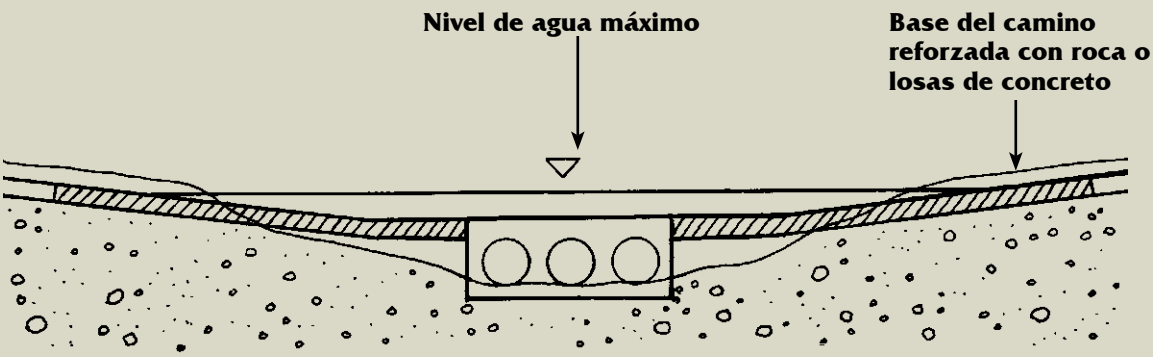
Desventajas de los Vados

- Las estructuras tipo vado implican ciertos retrasos periódicos u ocasionales en el tránsito durante periodos de alto caudal.
- La configuración no se adapta fácilmente a desagües o arroyos profundos en el terreno para los cuales se necesitarían rellenos de gran altura.
- Debido a que la geometría de la estructura implica una depresión en la superficie y retrasos periódicos, en general no son recomendables para caminos de mucho tránsito ni de alta velocidad.
- Los vados con alcantarillas pueden represar los arrastres en el cauce de un arroyo y ocasionar la obstrucción de la alcantarilla, lo cual implica mantenimiento y origina otros ajustes en el cauce.
- La migración de peces puede ser una característica difícil de incorporar en el diseño.
- El cruce de la estructura puede ser peligroso durante periodos de gran caudal (véase la Figura 9.2)

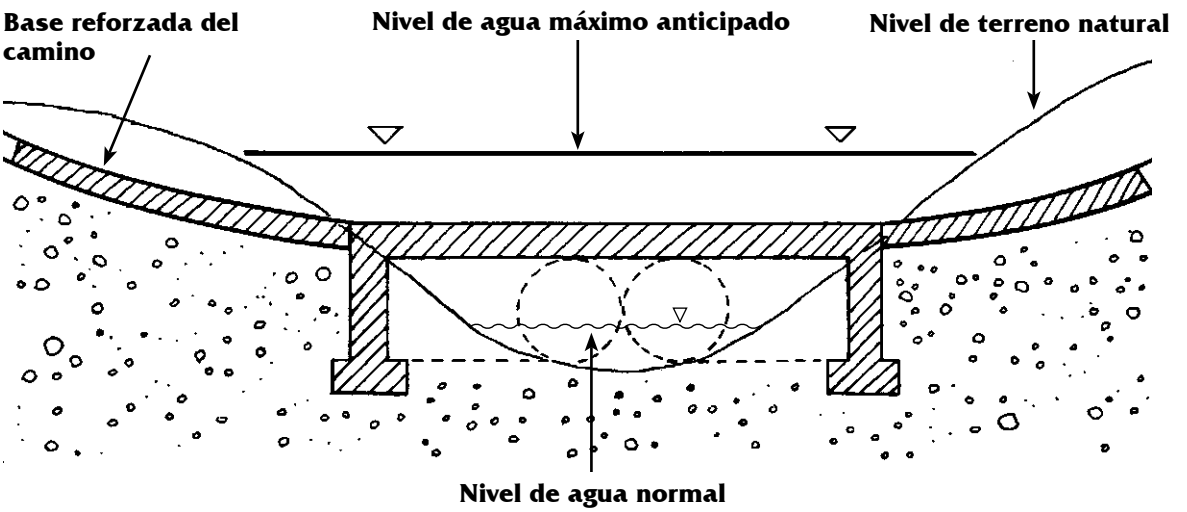
Figura 9.1 Opciones básicas de cruces en estiaje (vados o badenes). Nota: Proteja la superficie del camino (con roca, refuerzo de concreto, etc.) hasta una elevación por arriba del nivel de aguas máximas!



a. Cruce en estiaje simple con la base del camino reforzada con roca o concreto.

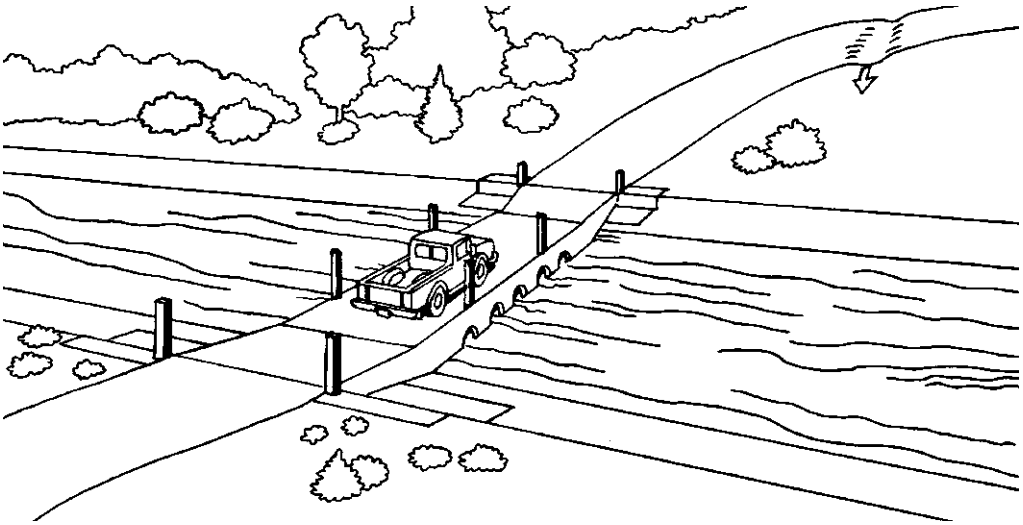


b. Vado mejorado o con alcantarillas de tubos en un cauce ancho con poca profundidad.

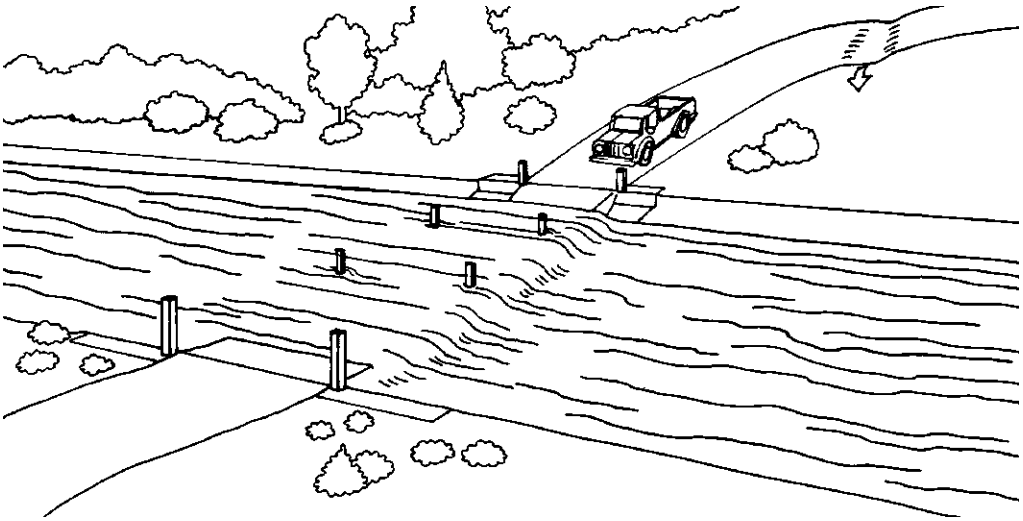


c. Vado con alcantarillas de tubos o de cajones de concreto en un cauce profundo.

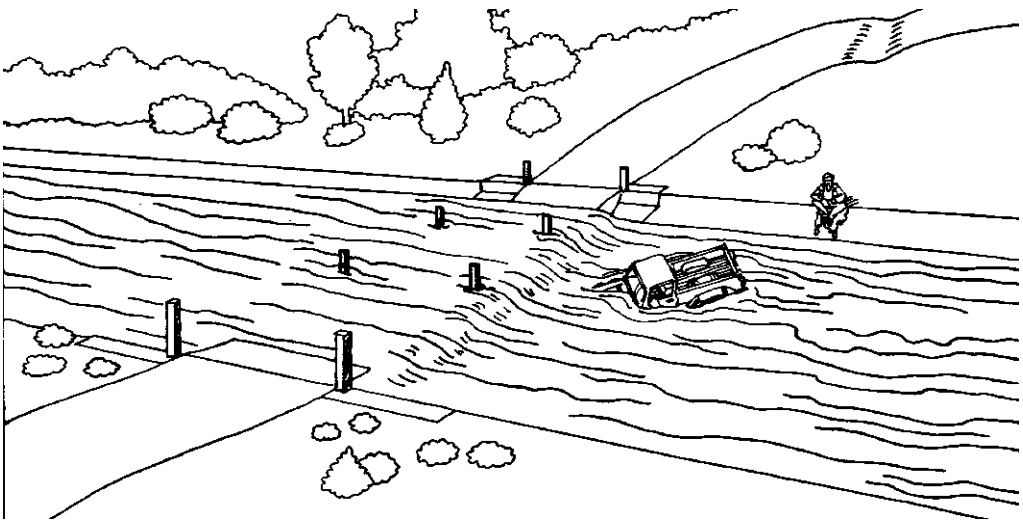
Figura 9.2 Peligro de cruzar un vado en inundaciones grandes. Los vados implican retrasos ocasionales en el tránsito durante periodos de inundaciones grandes. (Adaptado de Martin Ochoa, 2000 and PIARC Road Maintenance Handbook, 1994)



a. Cruce en estiaje con niveles bajos de agua.



b. Cruce en estiaje durante inundaciones ¡ESPERE!



c. ¡El intentar cruzar durante inundaciones puede resultar peligroso!

Prácticas Recomendadas

- Usar una estructura o una losa suficientemente largas para proteger el "perímetro mojado" del cauce natural del arroyo. Agregar protección por arriba del nivel esperado de aguas máximas (Foto 9.3). Permitir un cierto borde libre, típicamente de entre 0,3 y 0,5 metros en la elevación, entre la parte superior de la superficie reforzada de rodadura (losa) y el nivel de aguas máximas esperado (véase la Figura 9.1). La capacidad de descarga de un vado, y por lo tanto el nivel de aguas máximas, se pueden determinar a partir de cualquier fórmula aplicable a "Vertedero de Cresta Ancha".
- Proteger toda la estructura con pantallas impermeables, enrocamiento, gaviones, losas de concreto, u otro tipo de protección contra la socavación. El borde aguas abajo de un vado es un punto particularmente crítico para efectos de socavación y necesita disipadores de energía o enrocamiento de protección debido al abatimiento típico del nivel del agua al salir de la estructura y a la aceleración del flujo a través de la losa.
- Para el caso de vados simples de roca, usar grandes fragmentos bien graduados en la base de la calzada a través de la barranca, que tengan la resistencia suficiente para resistir el flujo del agua. Aplicar los criterios mostrados en la Figura 6.1. Rellenar los huecos con fragmentos pequeños de roca limpia o con grava para proporcionar una superficie de rodadura tersa. A estas rocas pequeñas se les deberá dar mantenimiento periódico y se reemplazarán eventualmente.
- Usar vados para el cruce de cauces secos en temporadas o de arroyos con caudales pequeños durante la mayoría de los periodos de uso del camino. Emplear vados mejorados (con alcantarillas) con tubos o cajones de concreto para alcantarillas a fin de dejar pasar caudales en estiaje (Foto 9.4). Acomodar pasos para peces donde se necesiten usando alcantarillas de cajón con un fondo del canal con flujo natural (Figura 9.1b y Foto 9.5).
- Ubicar los vados donde las márgenes del arroyo sean bajas y donde el cauce esté bien confinado. En el caso de desagües de profundidad moderada, usar vados mejorados con alcantarillas de tubo o de cajón (Figura 9.1c).
- Idealmente construir las cimentaciones sobre material resistente a la socavación (roca sana o enrocamiento grueso) o por debajo de la profundidad esperada de socavación. Evitar la socavación de la cimentación o del cauce mediante el uso de enrocamiento pesado colocado localmente, jaulas de gaviones, refuerzo de concreto, o de vegetación densa.
- Usar marcadores de profundidad resistentes y bien colocados en los vados para advertir al tránsito de alturas peligrosas del agua (Figura 9.2).

Prácticas Que Deben Evitarse

- Construcción de curvas verticales pronunciadas en vados en las que puedan quedar atrapados camiones largos o remolques.
- Colocación de material de relleno para accesos dentro del canal de desagüe.
- Cruzando vados durante el nivel de aguas máximas.
- Colocación de cruces en estiaje sobre depósitos de suelos de grano fino susceptibles a la socavación, o adopción de diseños que no prevean protección contra la socavación.
- Construcción de vados que bloqueen el paso de peces tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo.

Foto 9.3 Con vados o cruces en estiaje, el borde aguas abajo de la estructura debe generalmente protegerse contra la socavación, mientras que todo el perímetro mojado (al nivel de aguas máximas) de la calzada debería reforzarse.

Foto 9.4 Vado mejorado con una abertura de cajón de concreto para pasar los flujos en estiaje, para mantener el tránsito fuera del agua la mayor parte del tiempo, minimizar los retrasos en el tránsito y para permitir el paso de peces.

Foto 9.5 Algunos vados pueden ser diseñados como estructuras de "puentes de aguas bajas". Deben ser diseñados para soportar desbordamientos ocasionales y tener resistencia a la erosión en la base. Esta estructura es ideal para la migración de peces.

Capítulo 10

Puentes

"Puentes -- generalmente la mejor, pero la más costosa estructura de drenaje. Proteja los puentes contra la socavación."

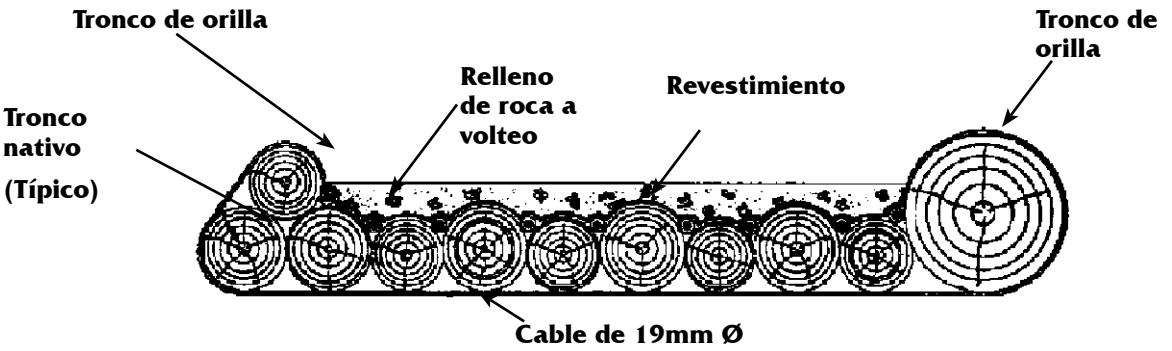
Los puentes resultan relativamente costosos, pero con frecuencia representan la estructura de cruce de arroyos más recomendable debido a que se puede construir fuera del cauce del arroyo y con ello se minimizan los cambios al canal, la excavación o la colocación de rellenos en el cauce natural. Con ellos se minimiza la alteración del fondo natural del arroyo y no implicarán retrasos en el tránsito una vez construidos. Resultan ideales para la migración de peces. Sin embargo, para ellos es necesario tomar en cuenta aspectos detallados del sitio y hacer un análisis hidráulico específico y diseño estructural.

La ubicación del puente y sus dimensiones las deberían determinar idealmente un ingeniero, un hidrólogo y un biólogo de pesca que trabajen en grupo asegurando un equipo interdisciplinario. Siempre que sea posible, se debe construir el puente en un punto donde se estreche la sección transversal del cauce y debería ubicarse en una zona subyacida por roca sana o por suelo grueso o enrocamiento adecuados como sitio de construcción del puente con buenas condiciones de cimentación. Muchas fallas de puentes tienen lugar debido a materiales finos de cimentación que son susceptibles a la socavación.

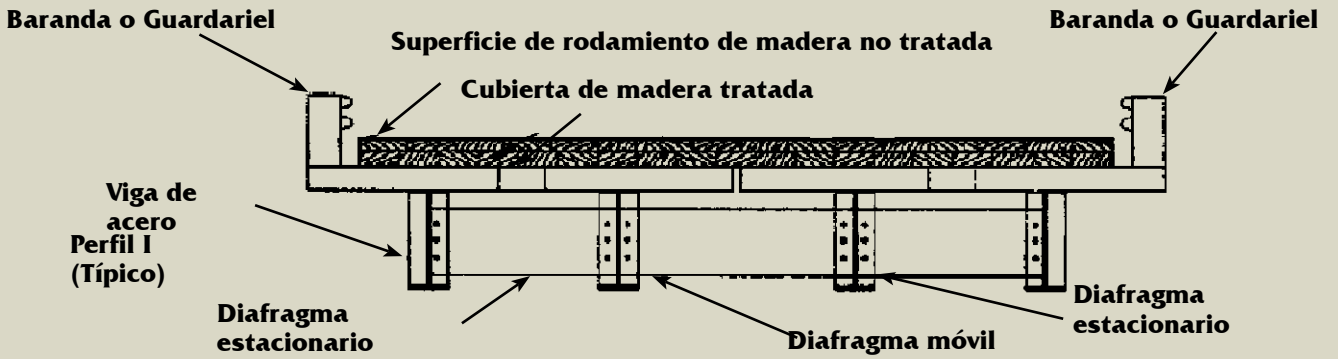
Los puentes se deben diseñar de tal forma que tengan la capacidad estructural adecuada para soportar el vehículo más pesado previsto. Los puentes de un solo claro se pueden construir a base de troncos, maderos, vigas de madera laminadas y pegadas, vigas de acero, plataformas de carros de ferrocarril, losas de concreto coladas en el lugar, losas ahuecadas de concreto prefabricado o vigas en "T", o pueden ser puentes modulares o temporales como los del tipo Hamilton EZ, Acker, o Bailey (véase la Figura 10.1). Muchos tipos de estructuras y de materiales resultan apropiados, siempre y cuando se diseñen estructuralmente (Foto 10.1).

Foto 10.1 Se pueden usar alcantarillas, vados o puentes para el cruce de arroyos. Use puentes para atravesar arroyos permanentes anchos, para minimizar las alteraciones al cauce y evitar retrasos en el tránsito. Use un claro lo suficientemnte ancho como para evitar la constricción en el canal natural. Ubique la cimentación sobre roca sana o por debajo de la profundidad de socavación.

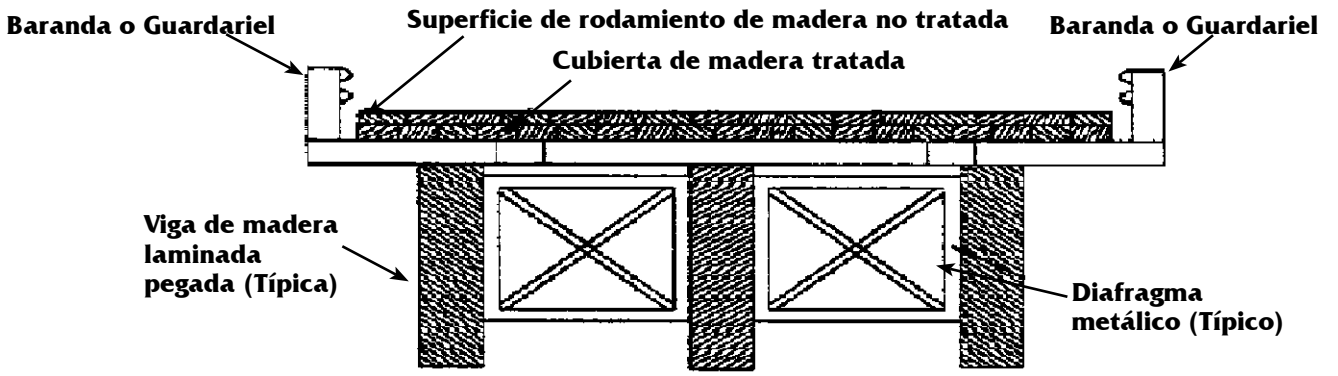
Figura 10.1 Tipos representativos de puentes usados en caminos rurales. (Adaptado de Groenier, S. 1995).



Sección transversal de un puente de largueros de troncos nativos



Sección transversal de un puente tipo Hamilton EZ (Modular)



Sección transversal típica de un puente de madera tratada laminada

Sección transversal típica de un puente de concreto pretensado de sección simple o en doble "T"

Foto 10.2 La estructura de un puente generalmente proporciona la mayor protección del canal al ubicarse fuera del arroyo. Emplee materiales locales (como pueder ser los troncos) para la construcción de puentes, siempre que estén disponibles, tomando en cuenta la vida útil, costo y mantenimiento. Inspeccione los puentes con regularidad y sustitúyalos cuando ya no resulten estructuralmente adecuados.

Los "diseños estandarizados" se pueden encontrar para el caso de mucho puentes sencillos en función del claro del puente y de las condiciones de carga. Las estructuras complejas deberán ser diseñadas específicamente por un ingeniero estructural. Los diseños de puentes con frecuencia necesitan de la aprobación de organismos o gobiernos locales. Son preferibles las estructuras de concreto porque pueden ser relativamente simples y baratas, requieren de un mantenimiento mínimo, y tienen una vida útil relativamente larga (100 años) en la mayoría de los ambientes. También se usan con frecuencia los puentes de troncos debido a la disponibilidad de materiales locales, sobre todo en zonas remotas, pero tenga presente que ellos tienen claros relativamente cortos y cuentan una vida útil más bien corta (10-25 años) (Foto 10.2).

Entre las cimentaciones para puentes se pueden mencionar soleras inferiores de troncos, gaviones, muros de retención de mampostería, o muros de retención de concreto sin contrafuertes apoyados en zapatas. En la Figura 10.2 se muestran detalles de cimentación simple de puentes. Para cimentaciones profundas con frecuencia se usan pilas excavadas en el lugar o pilotes hincados. La mayoría de las fallas de puentes ocurren ya sea debido a insuficiente capacidad hidráulica (demasiado pequeñas) o a la socavación y erosión de una cimentación colocada sobre suelos finos (Foto 10.3). Es por ello que las consideraciones de cimentación son críticas. Ya que las estructuras de puentes son en general costosas y los sitios se pueden complicar, la mayoría de los diseños de puentes se deben hacer con los datos proporcionados por ingenieros con experiencia y especializados en estructuras, hidráulica y geotecnia.

Es necesaria la inspección periódica (cada 2-4 años) y el mantenimiento frecuente de los

Foto 10.3 La socavación es una de las causas más comunes de falla de puentes. Use un claro lo suficientemente ancho para minimizar la constricción del canal natural. Ubique la cimentación del puente sobre roca sana siempre que sea posible, o por debajo de la profundidad de socavación, y recurra a medidas de protección de las márgenes, tales como enrocamiento, a fin de evitar la socavación.

puentes a fin de garantizar que la estructura es segura para circular sobre ella los vehículos previstos, que el cauce del arroyo está libre y para maximizar la vida útil de la estructura. Entre los aspectos típicos del mantenimiento de puentes se incluye la limpieza de la cubierta y de los "asientos" de las vigas; el desmonte de la vegetación y la eliminación de escombros del cauce del arroyo; la sustitución de marcadores y de señalamientos visuales; la reparación de obras de protección de las márgenes del arroyo; el tratamiento y revisión de la madera seca; sustitución de tuercas y tornillos faltantes; y repintado de la estructura.

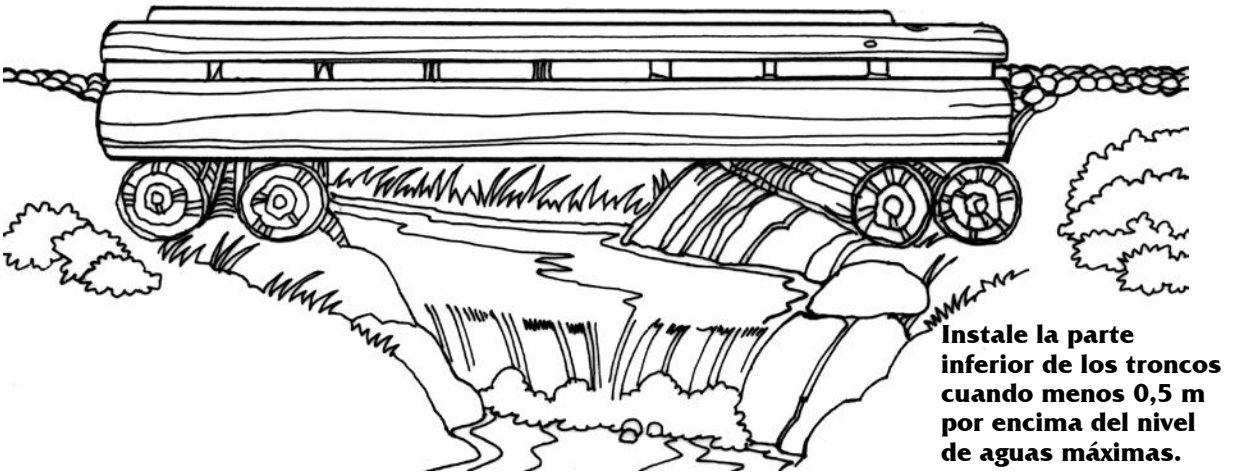
Prácticas Que Deben Evitarse

- Colocación de pilas o de zapatas dentro del cauce activo del arroyo o la mitad del canal.
- Colocación de material de relleno para accesos dentro del canal de desagüe.
- Colocación de cimentaciones estructurales sobre depósitos de suelos susceptibles a la socavación tales como limos y arenas finas.
- Constricción o reducción del ancho del cauce natural del arroyo.

Prácticas Recomendadas

- Usar **un claro de puente suficientemente largo** o una estructura de longitud adecuada para evitar constreñir el cauce natural de flujo del arroyo. Minimizar la constricción de cualquier canal de desbordamiento.
- Proteger los accesos de aguas arriba y de aguas abajo a las estructuras mediante muros de alero, enrocamiento, gaviones, vegetación u otro tipo de protección de taludes donde sea necesario (Foto 10.4).
- Colocar las cimentaciones sobre materiales no susceptibles a la socavación (idealmente roca sana (Foto 10.5) o enrocamiento grueso) o por debajo de la profundidad máxima esperada de socavación. Evitar la socavación de la cimentación o del cauce mediante la colocación local de enrocamiento de protección pesado, de jaulas de gaviones, o de refuerzo de concreto. Recurrir a la protección contra socavación siempre que sea necesaria.
- Ubicar los puentes donde el canal del arroyo sea estrecho, recto y uniforme. Evitar colocar los estribos dentro de la cuenca activa del arroyo. Donde sea necesario, colocar los estribos dentro de la cuenca en una dirección paralela al flujo del agua.
- Considerar los ajustes al cauce natural y posibles cambios en la ubicación del canal durante la vida útil de la estructura. Los canales que son sinuosos, que tienen meandros o que cuentan con extensas llanuras de inundación pueden cambiar de lugar dentro de esa zona de flujo histórico como resultado de un evento importante de tormenta.
- En el caso de estribos de puente o de zapatas colocadas sobre laderas naturales, desplantar la estructura en terreno natural firme (no en material de relleno ni en suelo suelto) a una profundidad mínima comprendida entre 0,5 y 2,0 metros. Usar estructuras de retención en caso necesario en desagües profundos y escarpados para sostener los rellenos de acceso, o use un puente con claro relativamente largo (Figura 10.2).
- Diseñar los puentes para un evento de 50 a 100 años de periodo de retorno. Para las estructuras costosas y en aquéllas cuya falla puede causar daños importantes mayores se justifica la realización de diseños conservadores.
- Permitir un cierto bordo libre, generalmente de cuando menos 0,5 a 1,0 metro, entre la parte inferior de las vigas del puente y el nivel de aguas máximas esperado con escombros flotantes. Las estructuras en un ambiente tropical con precipitaciones pluviales muy intensas pueden requerir un bordo libre adicional. Alternativamente, se puede diseñar un puente para que el agua pase sobre él, de la misma manera que un vado en estiaje, y así eliminar la necesidad de bordo libre, pero esto aumenta la necesidad de tener una cubierta resistente a la erosión así como losas de aproximación (Foto 10.6).
- Llevar a cabo inspecciones del puente cada 2 a 4 años. Programe el mantenimiento del puente a medida que se necesite para alargar la vida útil y la función de la estructura.

Figura 10.2 Instalación de un puente con detalles de cimentación simples.



Instalación típica de un puente de troncos

Asegúrese de que el puente cuenta con una capacidad de flujo adecuada por debajo de la estructura. Mantenga el material de relleno y los estribos o zapatas fuera del cuace del arroyo. Apoye las zapatas en las márgenes del arroyo, por encima del nivel de aguas máximas, o por debajo de la profundidad de socavación, si se encuentran cerca del cauce. Adicionar protección contra la socavación, como puede ser enrocamiento.

Mantenga los troncos o la losa de cubierta cuando menos a una distancia de 0,5 a 2 metros por encima del nivel esperado de aguas máximas, para poder desalojar los caudales de avenidas grandes, más los escombros.

Detalle de los estribos simples del puente

Desplante la cimentación del puente (estribos de gaviones, zapatas o troncos) sobre la roca o sobre un suelo firme y estable. Empotre las zapatas entre 0,5 y 2 metros dentro del material firme.

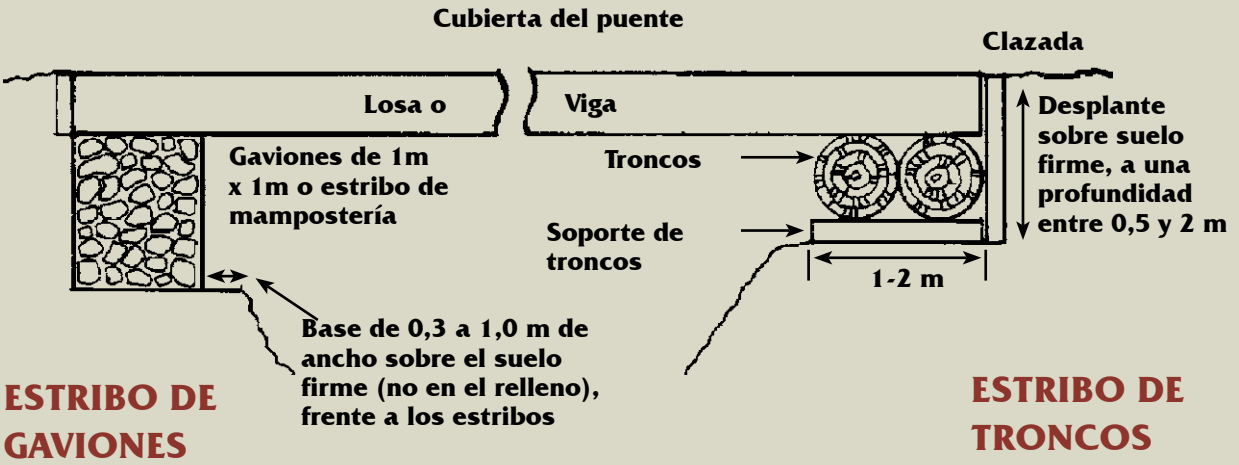


Foto 10.4 Las estructuras de concreto tienen una larga vida útil y en general resultan muy costo-efectivas. Proteja las márgenes, por ejemplo con enrocamiento, sobre todo a la entrada y a la salida de las estructuras.

Foto 10.5 Coloque la cimentación del puente sobre roca sana o de ser posible sobre un material no susceptible a la socavación. En materiales propensos a la socavación, protegerlos contra la misma o usar una cimentación profunda.

Foto 10.6 Aquí se muestra un puente de madera tratada bien construido, con buena protección de las márgenes del arroyo y un claro adecaudo para minimizar los impactos del flujo del canal. El borde libre que se muestra es marginalmente adecuado.

Capítulo 11

Estabilización de Taludes y Estabilidad de Cortes y Rellenos

"Construya taludes y realice cortes que no sean demasiado empinados para que sean estables a través del tiempo y que puedan ser reforestados."

LOS OBJETIVOS DE LOS CORTES y rellenos comunes en caminos son: 1) crear espacio para el camino; 2) para balancear las cantidades de materiales de corte y de relleno; 3) permanecer estables con el paso del tiempo; 4) no ser causa de la formación de sedimentos; y 5) minimizar los costos a largo plazo. Los deslizamientos de tierra y las fallas en los cortes y rellenos de caminos pueden ser la fuente principal de la formación de sedimentos, pueden causar el cierre del camino, pueden requerir reparaciones mayores, y pueden aumentar en gran medida los costos de mantenimiento del camino (Foto 11.1). No se deben dejar cortes con taludes verticales a menos que el corte sea en roca o en un suelo muy cementado. Los cortes en talud estables a largo plazo en la mayor parte de los suelos y de las zonas geográficas tienen una inclinación típica de 1:1 o de ¾:1 (horizontal:vertical) (Foto 11.2). Idealmente, los taludes tanto de cortes como de terraplenes deben construirse de tal forma que se puedan reforestar (Foto 11.3), pero los cortes hechos en suelos compactos y estériles o en materiales rocosos son difíciles de sembrar.

Los taludes en rellenos se deben dejar con una inclinación de 1½:1 o más tendidos. Los taludes de terraplenes demasiado escarpados (con inclinaciones mayores de 1½:1), generalmente formados al vaciar a volteo material suelto de relleno, pueden seguirse desmoronando con el tiempo, son difíciles de estabilizar, y están sujetos a fallas del tipo de hendiduras longitudinales en el relleno (Foto 11.4). Un relleno de roca puede ser estable con una pendiente de 1-1/3:1. Idealmente, los terraplenes deberían construirse con taludes de 2:1 o más tendidos para promover el crecimiento de la vegetación y la estabilización de los taludes (Foto 11.5).

En la Tabla 11.1 se presenta una gama de relaciones de talud que se usan comúnmente para los cortes y terraplenes y que son apropiados para los tipos de suelos y de rocas mencionados en la tabla. Por otro lado, en las Figuras 11.1 y 11.2 se muestran opciones típicas de diseño de taludes en cortes y terraplenes,

Foto 11.1 Tanto laderas muy abruptas, como zonas húmedas o de deslizamientos, pueden dar lugar a problemas de inestabilidad de los cortes de un camino y aumentar los costos de reparación y mantenimiento.

Foto 11.2 Construya los taludes de corte con inclinaciones de ¾:1 o más tendidos en la mayor parte de los suelos, para lograr estabilidad a largo plazo. En suelos muy cementados y en roca (parte inferior del corte), un talud de ¼:1 resultará generalmente estable.

Foto 11.3 Talud de corte perfectamente estable, con una pendiente aproximada de 1:1 y bien protegido con vegetación.

Foto 11.4 Evite taludes de terraplén sueltos y excesivamente escarpados (con inclinaciones arriba de 1 ½:1), sobre todo a lo largo de arroyos y cruces de agua.

respectivamente, para distintas condiciones de taludes y de sitios. Observe, sin embargo, que las condiciones locales pueden variar grandemente, por lo que la determinación de taludes estables debería basarse en experiencias locales y en un buen criterio. El agua subterránea es la causa principal de falla de taludes.

Las fallas de talud, o deslizamientos de tierra, suceden generalmente cuando un talud está demasiado inclinado, donde el material de relleno no está compactado, o donde los cortes en suelos naturales del lugar alcanzan el agua subterránea o penetran en zonas de material pobre. Con una buena ubicación del camino se puede con frecuencia evitar las zonas con deslizamientos de tierras y con ello reducir las fallas de talud. Cuando las fallas llegan a ocurrir, se deberá estabilizar la zona de deslizamiento removiendo el material caído, haciendo el talud más tendido, agregando drenaje, o empleando estructuras, etc., como se comenta más adelante. En la Figura 11.3 se muestran algunas de las causas comunes de fallas en taludes, junto con soluciones generales. Los diseños son típicamente particulares para cada sitio y podrán requerir la participación de ingenieros expertos en geotecnia y en geología. Las fallas que ocurren típicamente afectan las operaciones del camino y el costo de su reparación puede ser alto. Las fallas cercanas a arroyos y a cruces de canales tienen como riesgo adicional la afectación de la calidad del agua.

Se cuenta con una amplia gama de medidas para la estabilización de taludes para que el

Foto 11.5 Construya los taludes de terraplenes con una inclinación de 1 ½:1 o más tendidos, para promover el crecimiento de la vegetación y estabilizar la superficie.

Tabla 11.1

Relaciones Comunes de Taludes Estables, para Diferentes Condiciones de Suelo/Roca

Condición Suelo/Roca	Relación de talud (Hor:Vert)
La mayoría de las rocas	¼:1 a ½:1
Suelos muy cementados	¼:1 a ½:1
La mayoría de los suelos locales	¾:1 a 1:1
Roca muy fracturada	1:1 a 1 ½:1
Suelos granulares gruesos sueltos	1 ½:1
Suelos muy arcillosos	2:1 a 3:1
Zonas blandas con abundantes arcillas o zonas humedecidas por filtraciones	2:1 a 3:1
Rellenos de la mayoría de los suelos	1 ½:1 a 2:1
Rellenos de roca dura angular	1 1/3:1
Cortes y rellenos de baja altura (<2-3 m de altura)	2:1 o más tendidos (para reforestación)

Figura 11.1 Opciones de diseño para taludes de corte.

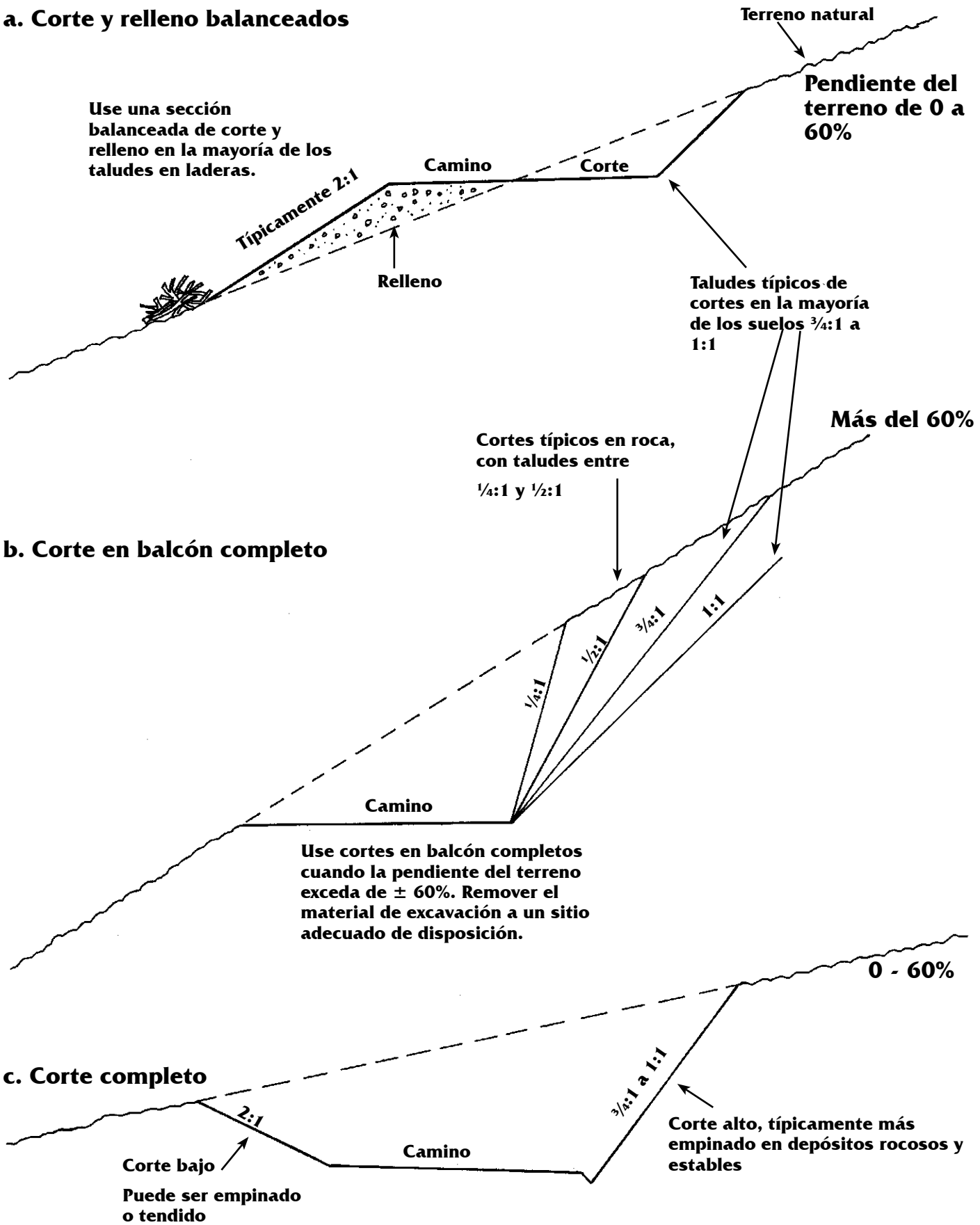


Figura 11.2 Opciones de diseño para taludes de terraplén.

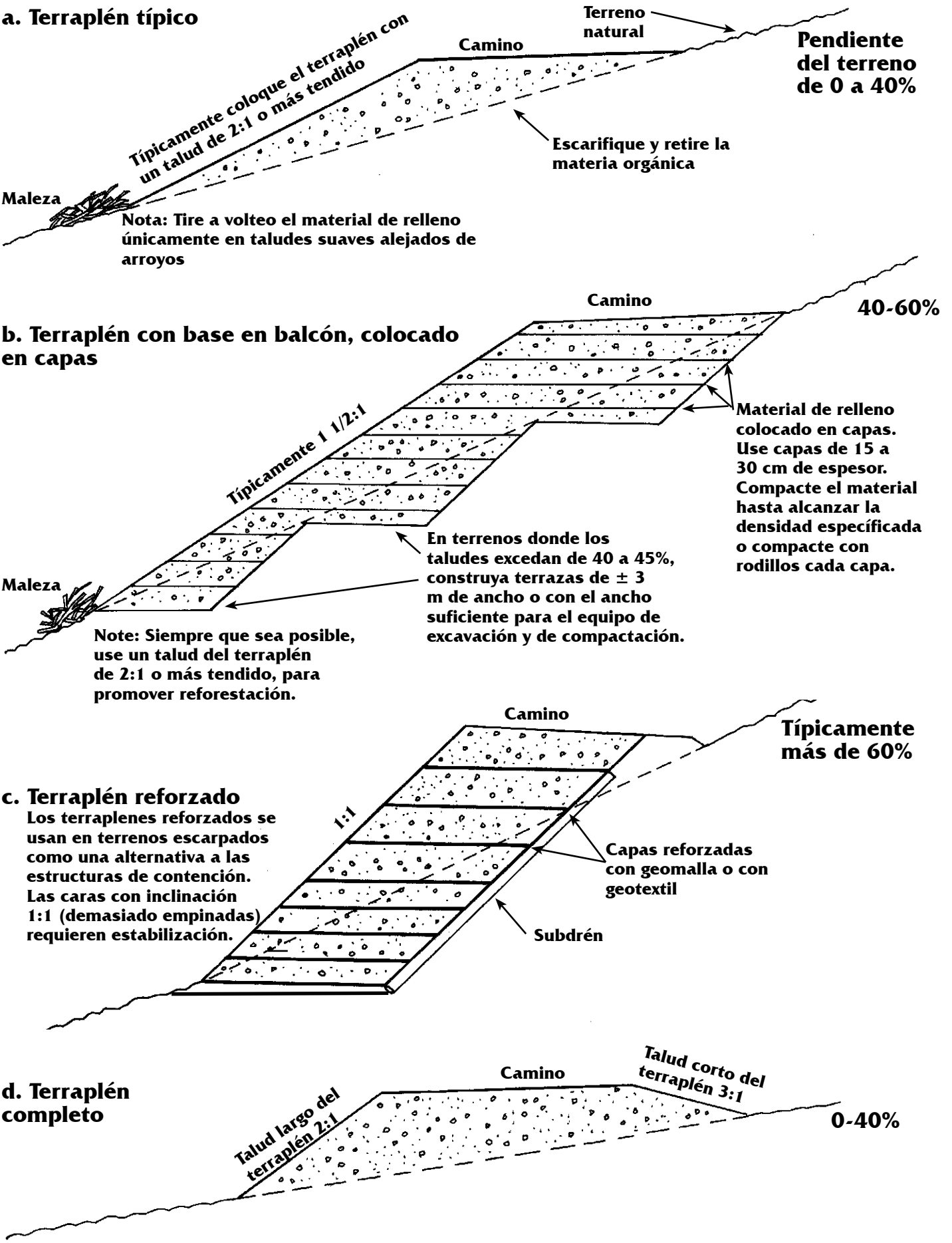
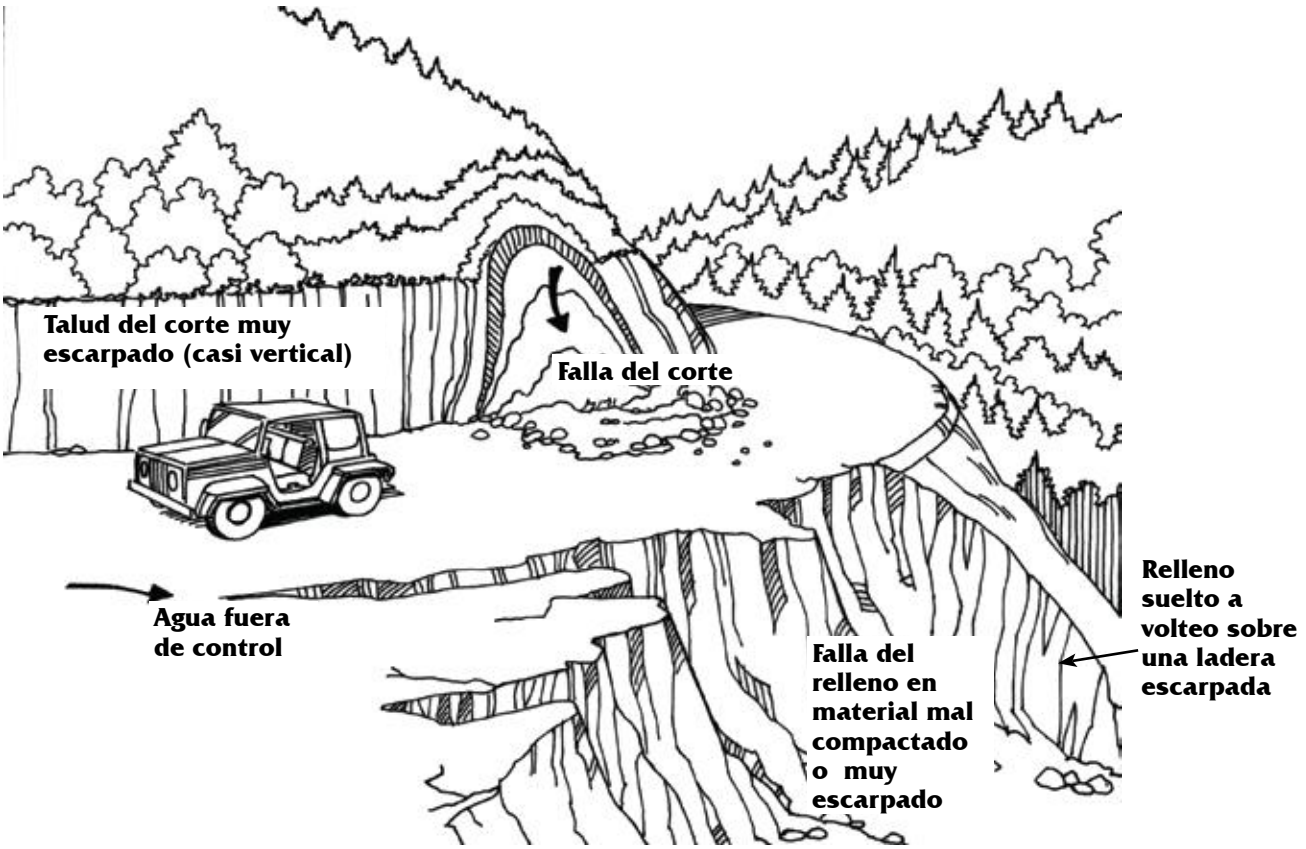
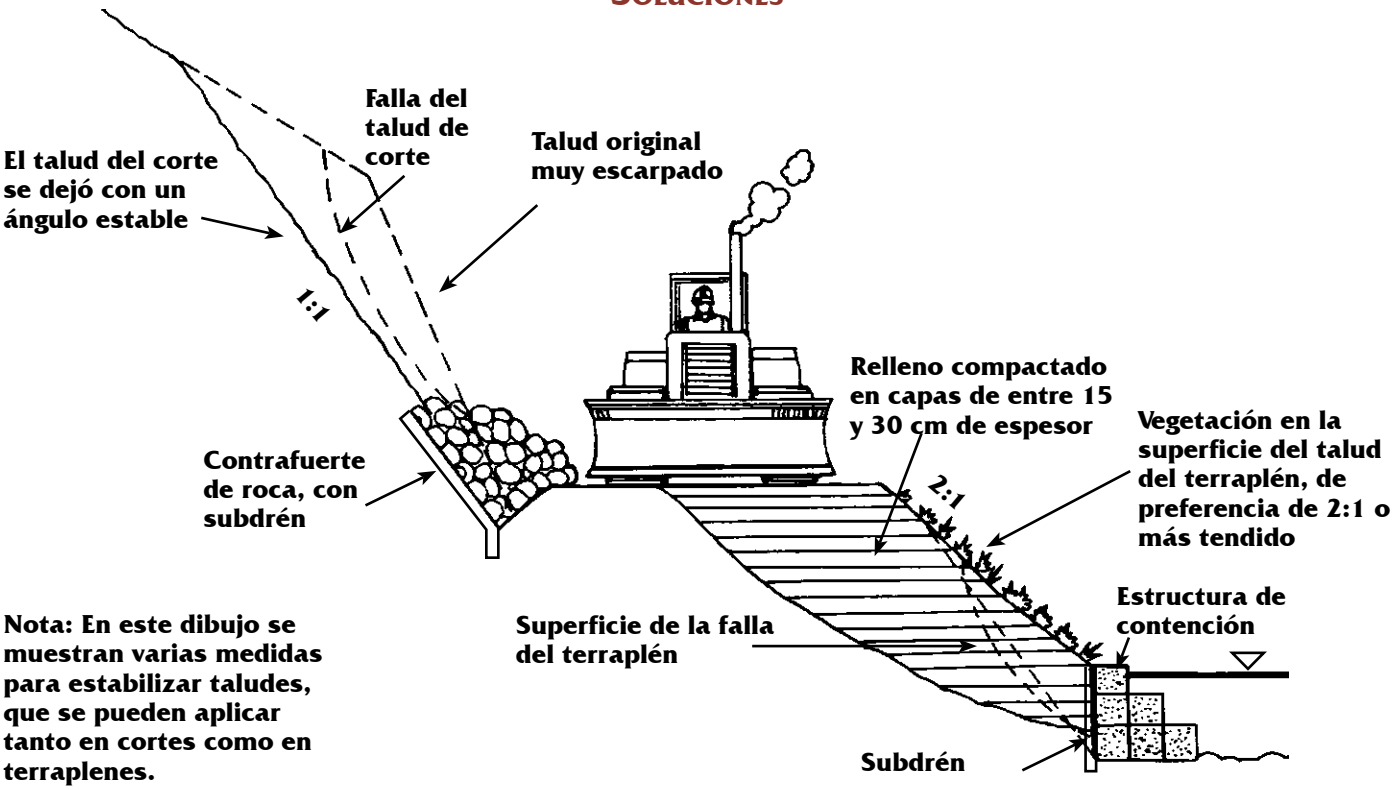


Figura 11.3 Problemas en taludes y soluciones con medidas de estabilización.

El Problema



Soluciones



Nota: En este dibujo se muestran varias medidas para estabilizar taludes, que se pueden aplicar tanto en cortes como en terraplenes.

Foto 11.6 Compactación simple a mano, por detrás de un muro de roca. La compactación es importante en la parte posterior de cualquier estructura de contención o de un relleno.

ingeniero pueda resolver los problemas de estabilidad de taludes y poder atravesar una zona inestable. En la mayor parte de los trabajos de excavación y de construcción de terraplenes, mediante taludes relativamente tendidos, una buena compactación y la dotación del drenaje necesario se podrá eliminar en términos generales la mayoría de los problemas rutinarios de inestabilidad (Foto 11.6). Una vez ocurrida una falla, la medida de estabilización más apropiada dependerá de las condiciones particulares del sitio tales como la magnitud del deslizamiento, el tipo de suelo, el uso del camino, las restricciones de alineamiento, y la causa de la falla. A continuación se presenta una gama de opciones típicas para estabilización de taludes adecuadas para el caso de caminos de bajo volumen de tránsito, las cuales se presentan en términos generales desde las más sencillas hasta las más complejas y caras, a saber:

- Retire el material del deslizamiento.
- Libre el deslizamiento con rampas o realinee el camino alrededor de la falla.
- Reforeste el talud y añada estabilización en forma puntual (véase la Foto 13.10).
- Tienda o reconstruya el talud.
- Suba o baje el nivel del camino para apuntalar el corte o retire peso del deslizamiento, respectivamente.
- Reubique el camino a un sitio estable.
- Instale drenaje en el talud como puede ser mediante zanjas impermeables o extracción de agua por medio de drenes horizontales.
- Diseñe y construya contrafuertes (Foto 11.7), estructuras de contención, o anclajes en roca.

Las estructuras de contención son relativamente costosas pero necesarias en zonas angostas y abruptas para ganar terreno para el camino o para sostener el cuerpo del terraplén del camino sobre una ladera empinada, en lugar de hacer un corte grande del lado de la colina. También se pueden usar para la estabilización de taludes. En la Figura 11.4a se presenta información acerca de tipos comunes de muros de retención así como criterios simples de diseño para muros de roca (Figura 11.4b), en los que el ancho de su base es generalmente 0,7 veces la altura del muro (Foto 11.8). En la Figura 11.4c se presentan diseños comunes de muros tipo gravedad a base de gaviones y configuraciones de las jaulas para diferentes al-

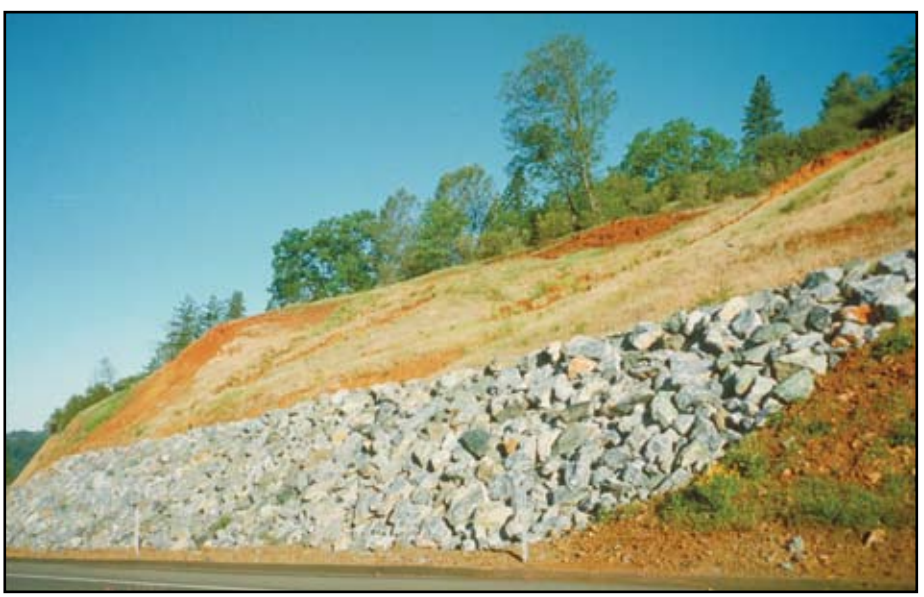
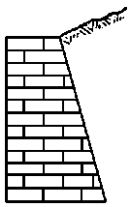


Foto 11.7 Se puede usar ocasionalmente un contrafuerte de roca permeable para estabilizar una zona de falla de talud en un corte.

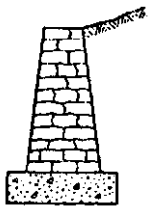
Figura 11.4 Construcción de varios tipos de estructuras de contención. (Adaptado de Gray & Leiser, 1982)

a. Tipos comunes de estructuras de contención.

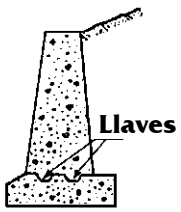
Muros de gravedad



Ladrillo o mampostería

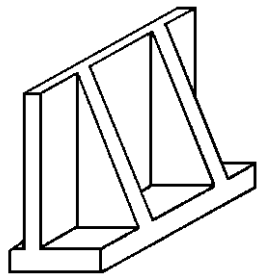


Roca



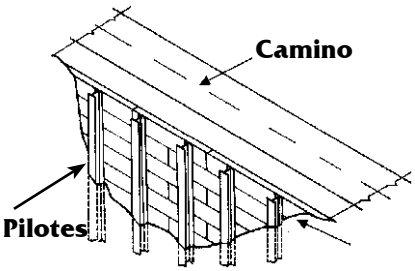
Concreto

Concreto con contrafuertes

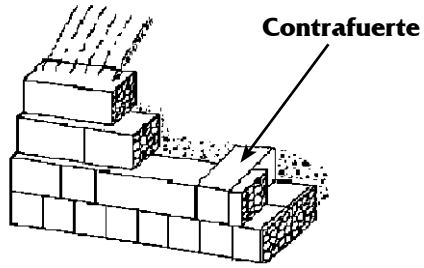


Concreto reforzado

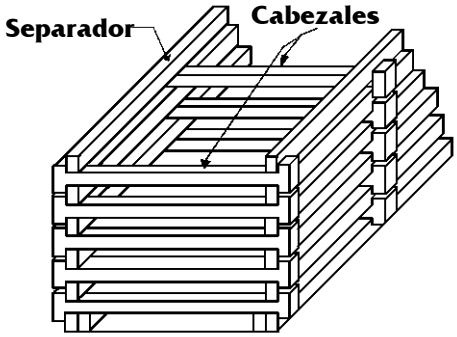
Pilotes "H"



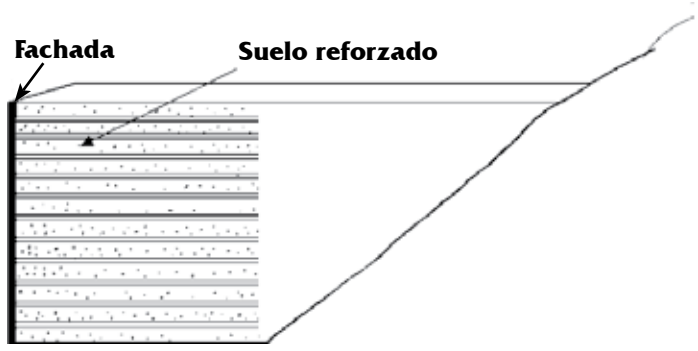
Muro de gaviones



Muro encofrado

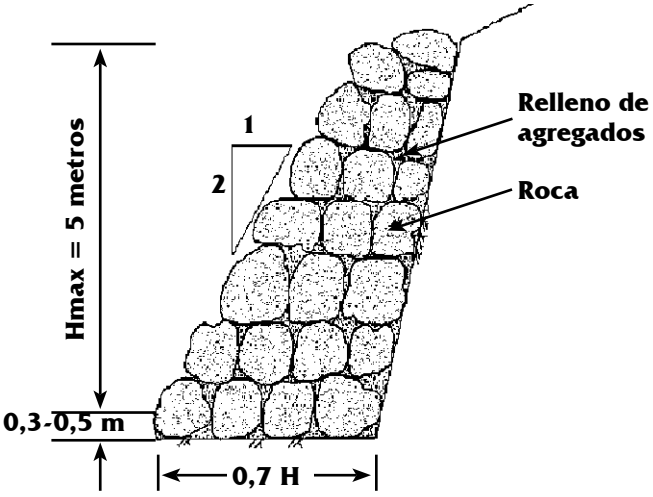


Muro de suelo reforzado



b. Construcción típica de un muros de roca.

Configuración para un muro alto de roca



Configuración para un muro bajo de roca

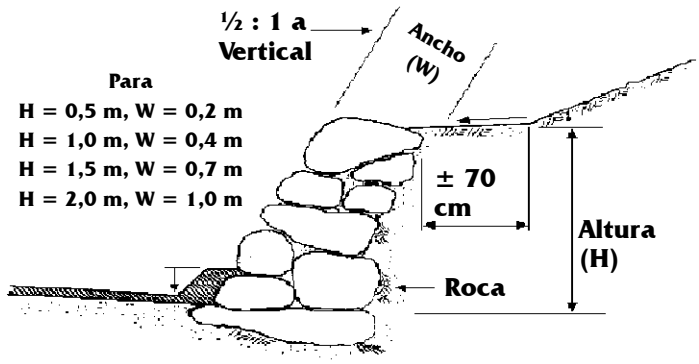
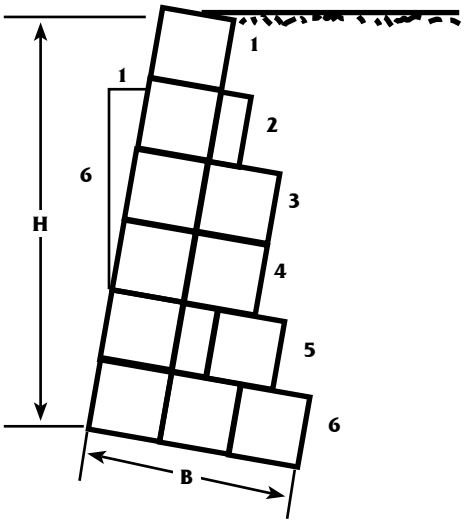


Figura 11.4 Continuación. (Adaptado de Gray & Leiser, 1982)

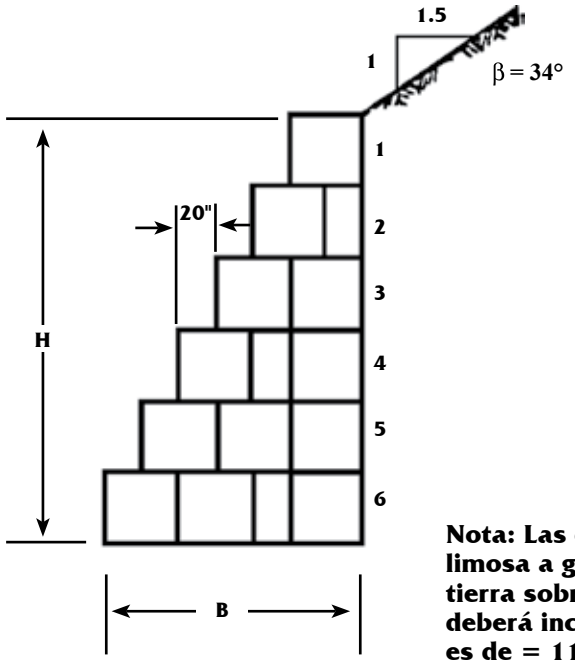
Diseño de gaviones

Relleno con superficie plana (fachada plana)



No. de Niveles	H	B	No. de Gaviones (por unidad de ancho)
1	3' 3"	3' 3"	1
2	6' 6"	4' 3"	1 1/2
3	9' 9"	5' 3"	2
4	13' 1"	6' 6"	2
5	16' 4"	8' 2"	2 1/2
6	19' 7"	9' 9"	3

Relleno con talud de 1 1/2:1 (fachada escalonada)



No. de Niveles	H	B	No. de Gaviones (por unidad de ancho)
1	3' 3"	3' 3"	1
2	6' 6"	4' 11"	1 1/2
3	9' 9"	6' 6"	2
4	13' 1"	8' 2"	2 1/2
5	16' 4"	9' 9"	3
6	19' 7"	11' 5"	3 1/2

Nota: Las condiciones de carga corresponden a rellenos de arena limosa a grava. Para suelos más finos o arcillosos, el empuje de la tierra sobre el muro aumentará y el ancho de la base del muro (B) deberá incrementarse para cada altura. El peso volumétrico del relleno es de = 110 pcf. (1.8 T/m³ ó 1,762 kg/m³)

- **-Debe ser seguro contra volteamiento para suelos con una capacidad de carga mínima de 2 T/pie² (19,500 kg/m²)**
- **-Para rellenos con superficie plana o inclinada, se puede usar un fachada plana o escalonada.**

c. Diseño estándar para estructuras de contención de gaviones de hasta 20 pies (6 metros) de altura, con relleno plano o inclinado (Adaptado de Gray and Leiser, 1982).

turas del muro. Las estructuras de gaviones son muy populares para muros de hasta unos seis metros de altura debido sobre todo a que se usa roca disponible localmente y se necesita mucha mano de obra (Foto 11.9).

Para el caso de muros bajos y altos en muchas zonas geográficas las estructuras de Tierra Estabilizada Mecánicamente (MSE por sus siglas en inglés), "Suelo Reforzado" o "Tierra Armada" son los muros menos costosos disponibles actualmente, son sencillos de construir y con frecuencia se puede usar material granular de relleno extraído en el sitio. Se construyen comúnmente usando capas de geotextiles o de malla de alambre soldado, colocadas entre capas de suelo de 15 a 45 cm de espesor con lo cual se agrega refuerzo a la tensión al suelo (véase la Figura 6.3e). Los pilotes H hincados o las tablestacas hincadas, con o sin tirantes, son relativamente costosos pero con frecuencia constituyen los tipos de muro de mayor aceptación ambiental porque causan menos alteraciones locales que las estructuras de gravedad o tipo MSE, las cuales requieren una gran excavación para su cimentación. La mayoría de los tipos de estructuras de retención proporcionadas por fabricantes son estables inter-

Prácticas Que Deben Evitarse

- Construcción de cortes con taludes verticales (excepto en suelos muy bien cementados y en roca).
- Ubicación de caminos donde el pie del relleno termina en el agua. No use métodos de colocación de rellenos a volteo en laderas escarpadas adyacentes a arroyos.
- Colocación de rellenos o de materiales a volteo en laderas de terreno natural con inclinaciones mayores de 60%.
- Ubicación de caminos en zonas con inestabilidad natural o conocida.
- Dejar los cortes, y particularmente los taludes de terraplén, desnudos y expuestos a la erosión.

Foto 11.8 Aplique métodos de estabilización física de taludes, tales como muros de contención, rellenos reforzados o contrafuertes de roca en caso necesario, en zonas con limitaciones de espacio o laderas muy pronunciadas.

Foto 11.9 Generalmente se usan los gaviones como estructuras de contención de baja altura tipo "de gravedad", porque usan roca disponible localmente y resultan relativamente baratas.

Prácticas Recomendadas

- Usar construcción balanceada de corte y relleno en la mayoría de los terrenos para minimizar los movimientos de tierra (Figura 11.1a).
- Usar un sistema constructivo con cortes en balcón en terrenos empinados (más de 60%). Considerar la construcción de un camino angosto de un solo carril con apartaderos de paso, para minimizar la excavación (Figura 11.1b).
- Construir taludes en corte en la mayor parte de los suelos usando una relación de talud en corte de 3/4:1 a 1:1 (horizontal a vertical) (Figura 11.1). Dejar taludes en corte más tendidos en suelos granulares gruesos y en suelos no consolidados, en zonas húmedas y en suelos blandos o muy arcillosos. Usar taludes en corte relativamente planos (2:1 o más tendidos) en cortes de baja altura (←2-3 metros de alto), para ayudar a promover el crecimiento de la vegetación.
- Construir taludes en cortes de roca usando una relación de talud en corte de 1/4:1 a 1/2:1 (Figura 11.1).
- Usar cortes casi verticales (1/4:1 o más parados) únicamente en roca estable o en suelos muy cementados, tales como ceniza volcánica cementada o suelo de granito intemperizado en el lugar, donde el riesgo de erosión superficial o de desmoronamiento contínuo de un corte relativamente plano, sea grande y el riesgo de fallas locales en el corte empinado sea bajo.
- Donde se cuente con casos reales de larga duración, aplicar la experiencia local, así como ensayes y análisis ideales de materiales, para determinar el ángulo estable de corte para un tipo de suelo en particular.
- Conducir el agua superficial (escurrimiento) hacia afuera de los taludes de cortes y terraplenes.
- Colocar el desperdicio maderero de la construcción y rocas a lo largo del pie de taludes de terraplenes (véase Diseño de caminos, Figura 4.2). ¡No entierre el desperdicio maderero en el terraplén!.
- Deshacerse del material de excavación sobrante o no adecuado en lugares que no vayan a causar la degradación de la calidad del agua ni otros daños a los recursos naturales.
- Construir rellenos con una relación de talud de terraplén de 1-1/2:1 (horizontal a vertical) o más tendido. En la mayoría de los suelos un talud de terraplén de 2:1 o más tendido promoverá el crecimiento de vegetación (Figura 11.2a). En suelos tropicales con alto contenido de arcilla dentro de zonas muy lluviosas, un talud de terraplén de 3:1 es recomendable.
- Compactar los taludes de terraplén en zonas sensibles o donde el relleno se construya con suelos erosionables o de mala calidad. Usar procedimientos específicos de construcción tales como apisonamiento con rodillos, colocación del relleno en capas (de 15 a 30 cm de espesor), o uso de equipos de compactación específicos cuando estén disponibles (Figura 11.2b).
- Retirar el material orgánico superficial, colocar una terraza al pie, y construir terrazas en la superficie del terreno natural cuando las laderas tengan una inclinación de entre 40 y 60% antes de proceder a colocar el relleno sobre el suelo original (Figura 11.2b) con el fin de evitar una falla tipo "relleno de hendiduras" en el contacto entre el suelo nativo y el relleno. Si llegara a ocurrir una falla del relleno en un talud escarpado, se necesitará para las reparaciones una estructura de contención o un relleno reforzado (Foto 11.10).
- Considerar la utilización de rellenos reforzados cuando un talud de terraplén de 1:1 se adapte al terreno natural estable (véase la Figura 11.2c). Usar rellenos reforzados como una alternativa de bajo costo en comparación con las estructuras de retención.
- Aplicar medidas físicas y biotécnicas de estabilización de taludes tales como estructuras de contención, contrafuertes, capas de maleza y drenaje, en caso necesario para lograr taludes estables (Figuras 11.3 y 11.4). Las estructuras de contención pueden estar formadas por enrocamiento suelto, gaviones, concreto reforzado, pilotes, encofrados, tabla, estacado, clavos de suelo o muros de tierra estabilizada mecánicamente con una gran variedad de revestimientos como geotextiles, malla de alambre soldado, madera, bloques de concreto o llantas (Foto 11.11). El relleno en el respaldo del muro se compacta generalmente al 95% del peso volumétrico máximo de la norma AASHTO T-99.
- Use estructuras de retención para ganar ancho del camino en terrenos empinados.
- Colocar las estructuras de retención únicamente sobre buenos materiales de construcción, como puede ser roca sana o suelos firmes locales (Foto 11.12).

namente para el uso especificado, las condiciones del sitio previstas y la altura establecida. La mayoría de las fallas de muros ocurren como resultado de **una falla de la cimentación**. Por lo tanto las estructuras deben colocarse sobre una buena cimentación, como puede ser roca sana o suelo firme local.

Foto 11.10 Falla del relleno de un camino en terreno escarpado, para el que ahora se requiere una estructura de contención o un corte alto para retener o ampliar el camino alrededor de la falla.

Foto 11.11 Muro de contención de tierra estabilizada mecánicamente (MSE), como Tierra Armada con la fachada protegida con llantas y con capas de refuerzo de geotextiles. Se usa para ampliar el camino en una zona con fallas en el terreno. Las estructuras tipo MSE son a menudo las estructuras de contención menos costosas disponibles. También se usan a menudo muros de malla de alambre soldado.

Foto 11.12 Una estructura de gaviones que fallará pronto debido a la falta de una cimentación adecuada. Todas las estructuras de retención, ya sean MSE o muros de gravedad, requieren una buena cimentación.

Capítulo 12

Materiales para Caminos y Bancos de Materiales

"Seleccione materiales de calidad para el camino, que sean durables, bien graduados y que tengan buen desempeño en el camino. Mantega un buen control de calidad."

LAS SUPERFICIES DE CAMINOS de bajo volumen y las secciones estructurales se construyen generalmente de materiales locales que deben soportar a vehículos livianos, que quizá tendrán que soportar el tránsito de camiones de carga pesados. Además, deben tener una superficie de rodadura que, al estar húmeda, proporcione una tracción adecuada a los vehículos. La superficie de los caminos con suelos locales también constituye un área expuesta que puede producir cantidades importantes de sedimentos, sobre todo si tiene roderas (Foto 12.1).

MATERIALES PARA CAMINOS

Generalmente es recomendable, y en muchos casos necesario, agregar soporte adicional a la subrasante o mejorar la superficie natural del cuerpo del terraplén mediante materiales tales como grava, suelo rocoso grueso, agregados triturados, cantos rodados, bloques de concreto, o algún tipo de recubrimiento bituminoso como riego de sello, o inclusive un pavimento asfáltico, como se muestra en la Figura 12.1. La superficie de rodadura al mismo tiempo mejora el apoyo estructural y reduce la erosión de la superficie del camino. La selección del tipo de recubrimiento depende del volumen de tránsito, de los suelos locales, de los materiales disponibles, de la facilidad de mantenimiento y, a final de cuentas, del costo.

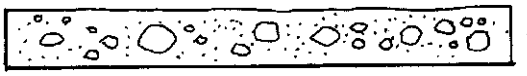
Existe una gama de opciones para mejorar la capacidad estructural de la calzada en zonas de suelos blandos o de subrasantes pobres. Entre ellas se pueden considerar generalmente las siguientes:

- Agregar material de mayor resistencia y calidad sobre el suelo blando, como puede ser una capa de grava o de agregado triturado;

Foto 12.1 Camino con roderas causadas ya sea por un suelo blando de subrasante o por drenaje inadecuado del camino (o ambos).

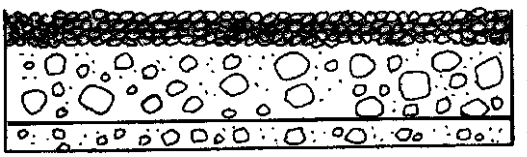
Figura 12.1 Tipos de revestimientos usados comúnmente para superficies de caminos rurales.

a. Suelo Nativo

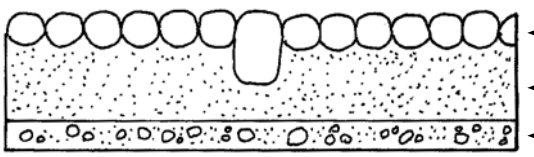


b. Agregados

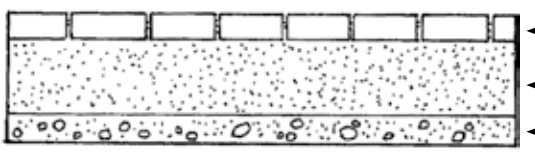
c. Base y Capa de Agregados



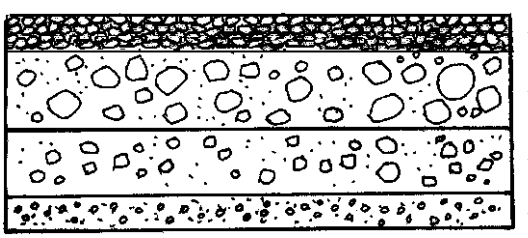
d. Empedrado



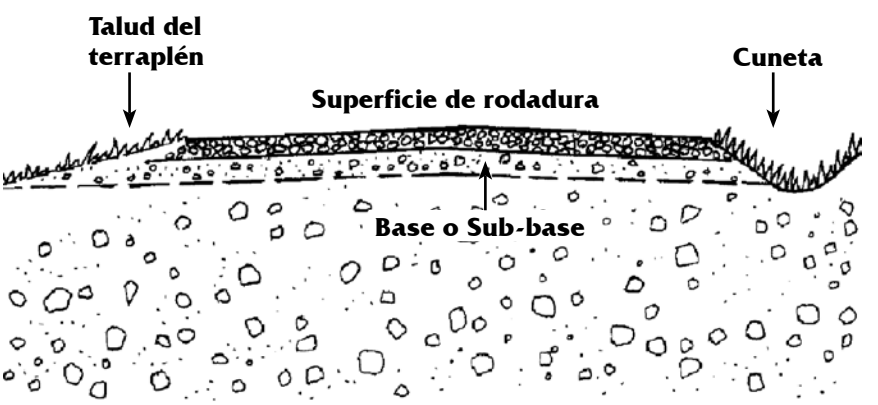
e.Bloques de Concreto (Adoquín)



f. Recubrimiento Asfáltico



g. Plantilla típica de un camino recubierto con agregados



- Mejorar el suelo blando en el lugar (in situ) al mezclarlo con aditivos estabilizadores tales como cal, cemento, asfalto o productos químicos;
- Cubrir o proteger el suelo blando con materiales tales como geotextiles o piezas de madera (camino de troncos);
- Remover el suelo blando o pobre y sustituirlo por un suelo de alta calidad o por material rocoso;
- Limitar el uso del camino durante periodos de clima lluvioso que es cuando los suelos arcillosos se reblandecen;
- Compactar el suelo local para aumentar su peso volumétrico y su resistencia; y
- Mantener el suelo sin humedad mediante un drenaje efectivo de la calzada o encapsulando al suelo para mantener el agua alejada de él.

Se pueden usar diversos materiales para estabilización tales como asfaltos, cal, cementos, resinas, lignina, cloruros, enzimas y productos químicos con el propósito de mejorar las propiedades físicas del suelo en el lugar. Pueden resultar muy redituables en cuanto a costo en zonas donde el agregado u otros materiales sean difíciles de conseguir o resulten caros. El mejor material para estabilización de suelos que se puede usar depende del costo, tipo de suelo, comportamiento y experiencia local. Con frecuencia se necesitarán secciones de prueba para determinar el producto que sea el más adecuado y el más efectivo con respecto al costo. Sin embargo, para muchos estabilizadores de suelo seguirá haciendo falta un cierto tipo de

Foto 12.2 Estabilice la superficie de la calzada con roca triturada (o con otro tipo de revestimiento) en pendientes empinados, zonas con suelos blandos o erosionables.

superficie de rodadura. Una superficie estabilizada de rodadura mejora la tracción y ofrece protección contra la erosión así como un apoyo estructural.

La grava, la roca de canteras, o el agregado triturado son los materiales más comunes para mejorar la superficie de rodadura que se usan en la construcción de caminos de bajo volumen de tránsito. (Foto 12.2). A veces se usan agregados pero únicamente como material de "relleno" de roderas, pero es más recomendable colocarlo como una sección estructural completa, como se ilustra en la Figura 12.2. El agregado para la superficie de rodadura del camino debe cumplir con dos funciones básicas: (1) Debe tener calidad suficientemente alta y el grosor suficiente para proporcionar apoyo estructural para el tránsito, así como para evitar la formación de roderas; y (2) Debe estar bien graduado y mezclarse con suficiente cantidad de finos, de preferencia con cierta plasticidad, para evitar el desmoronamiento y la formación de ondulaciones.

El espesor necesario del agregado varía típicamente entre 10 y 30 cm, dependiendo de la resistencia del suelo, del tránsito y del clima. En las referencias seleccionadas se pueden encontrar los procedimientos para el diseño específico de espesores de agregados. Encima de suelos muy blandos (California Bearing Ratio [CBR] o Valor Relativo de Soporte de menos de 3) el espesor de los agregados se puede reducir mediante el uso de un refuerzo de la subrasante a base de un geotextil o de una geomalla. Por otro lado, las capas de geotextil resultan útiles sobre suelos blandos para separar el agregado del suelo, para mantener al agregado sin contaminación, y para alargar la vida útil del agregado.

En la Figura 12.3 se presentan algunas de las propiedades físicas y arreglos de diferentes mezclas de suelo y agregado, en primer término sin finos (ningún material pasa la malla No. 200, con tamaño

Figura 12.2 Opciones utilizando agregados para evitar las roderas

POBRE

a. Cantidad mínima de agregados para llenar las roderas, a medida que éstas se producen.

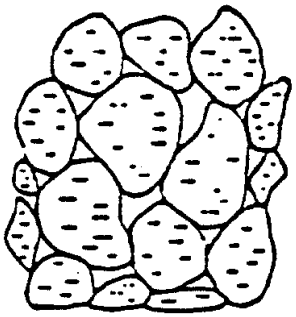
MEDIOCRE ADECUADO

b. Roderas rellenadas, más una capa de entre 10 y 15 cm de espesor de agregados.

LO MEJOR

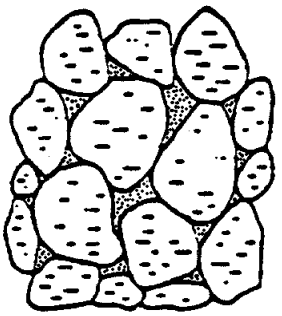
c. Se coloca una sección estructural completa sobre una subrasante compactada y rellenada.

Figura 12.3 Estados físicos de mezclas de suelos y agregados. (Adaptado de Yoder and Witczak, 1975)



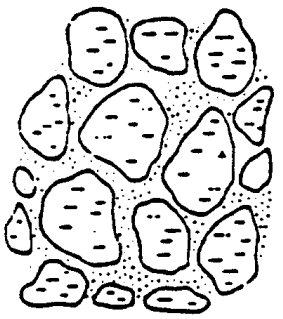
Agregado sin Finos

- Contacto entre granos
- Densidad variable
- Alta permeabilidad
- No susceptible al congelamiento
- Alta estabilidad estando confinado. Baja, si no lo está
- No es afectado por el agua
- Difícil de compactar
- Se desmorona fácilmente



Agregado con Suficientes Finos para lograr Densidad Máxima

- Contacto entre granos, con mayor resistencia a la deformación
- Aumenta hasta alcanzar la densidad máxima
- Baja permeabilidad
- Susceptible al congelamiento
- Relativamente alta estabilidad en condiciones con y sin confinamiento
- No es muy afectado por las condiciones adversas de agua
- Moderadamente fácil de compactar
- Buen desempeño en caminos

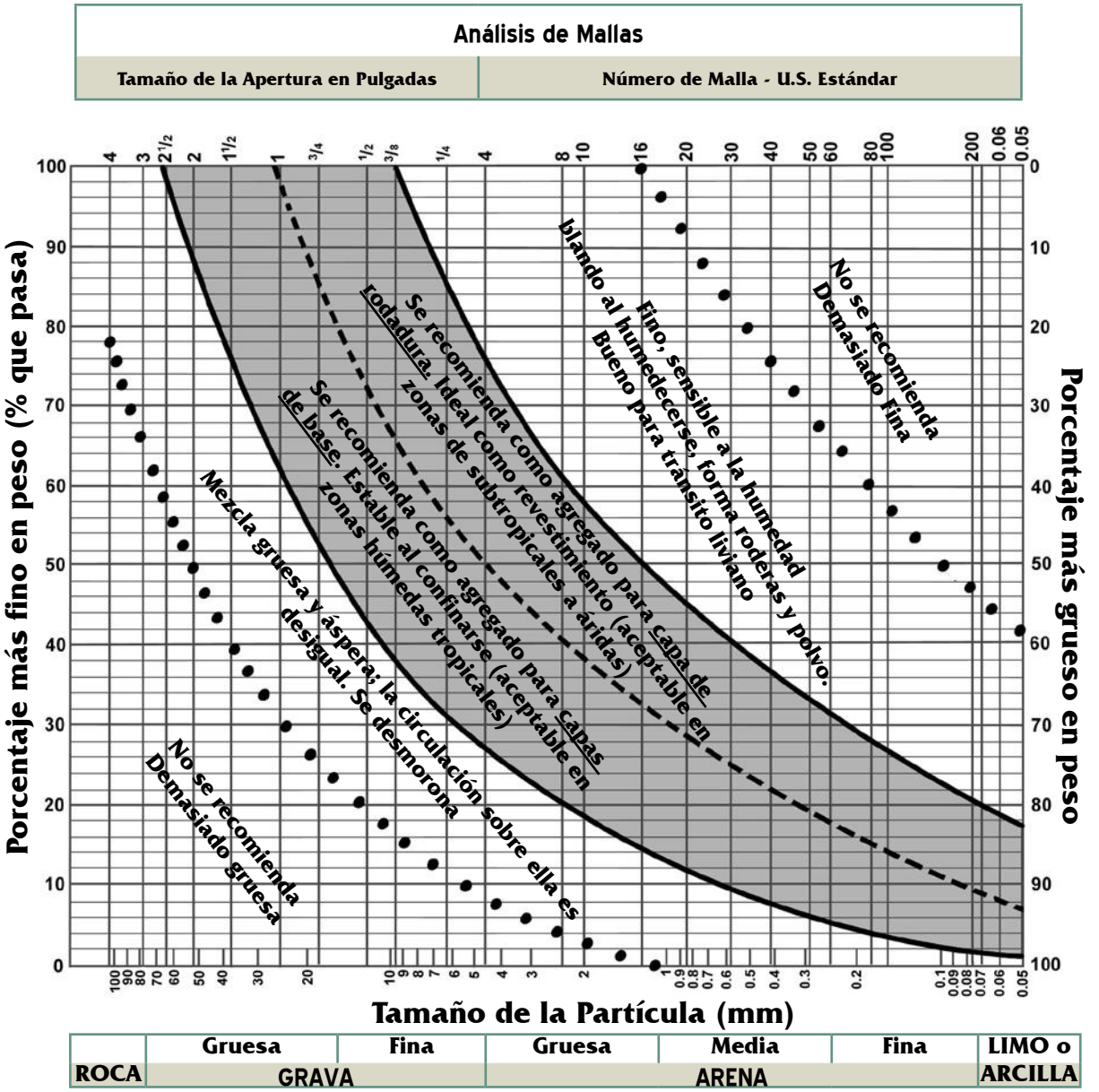


Agregado con Alto Porcentaje de Finos (> 30 %)

- Se destruye el contacto entre granos; el agregado "flota" dentro del suelo
- Disminución de la densidad
- Baja permeabilidad
- Susceptible al congelamiento
- Baja estabilidad y baja resistencia
- Lo afecta mucho el agua
- Fácil de compactar
- Se vuelve polvo fácilmente

Figura 12.4 Intervalos de variación de la granulometría para materiales de base y de revestimiento de caminos y sus características de comportamiento. (Adaptado de R. Charles, 1997 and the Association of Asphalt Paving Technologists)

Distribución Granulométrica



NOTA: Los intervalos de variación de la granulometría son aproximados.

Los mejores materiales para revestimiento de la superficie del camino son bien graduados, tienen granulometrías paralelas a las curvas arriba mostradas, y caen cerca de la curva "ideal" a la mitad de los intervalos de variación de la granulometría que se muestran.

Prácticas Que Deben Evitarse

- Operaciones de construcción o uso intensivo durante periodos húmedos o lluviosos en caminos con superficies de rodadura construidas con suelos arcillosos o de grano fino, que forman roderas.
- Dejar que se formen roderas y baches de más de 5 a 10 cm de profundidad en la superficie de rodadura.
- Estabilización de la superficie del camino usando enrocamiento grueso con fragmentos mayores de unos 7,5 cm. Es difícil circular sobre roca gruesa y se dificulta mantener estabilizada la superficie de rodadura, y además, daña las llantas.
- Uso de materiales de recubrimiento constituidos por suelos de grano fino; empleo de roca blanda que se degradará hasta convertirse en sedimentos finos; o uso de roca gruesa limpia mal graduada que se va a erosionar, a desmoronar o a formar ondulaciones.

de 0.074 mm de abertura), luego con un porcentaje ideal de finos (6-15%), y finalmente con exceso de finos (más de 15 a 30%). En la Figura 12.4 se muestran los intervalos típicos de granulometría de los agregados usados en la construcción de caminos, la forma en que los materiales, variando de gruesos a finos, se comportan mejor en la construcción de un camino, y las limitaciones aproximadas a los intervalos de variación recomendados para la granulometría. Se puede observar que el porcentaje deseable de finos en un agregado puede resultar sensible al clima, o medio ambiente del camino. En regiones semiáridas a desérticas, un porcentaje relativamente alto de finos, del orden del 15 al 20%, con plasticidad moderada, es lo más recomendable. En un ambiente "húmedo" muy lluvioso, tal como el de regiones tropicales, costeras, montañosas o selváticas, un porcentaje bajo de finos,

Prácticas Recomendadas

- Estabilizar la superficie de la calzada en el caso de caminos que forman roderas o que se desmoronan excesivamente. Entre las técnicas más comunes de estabilización superficial se incluye la colocación de una capa de agregado triturado de entre 10 y 15 cm de espesor; de materiales rocosos extraídos de canteras o cribados (Foto 12.4); de empedrados; de recortes de madera o de desperdicio vegetal fino de explotaciones forestales; o de suelos mezclados y estabilizados con cemento, asfalto, cal, lignina, cloruros, productos químicos, o enzimas.
- Para el caso de tránsito pesado sobre suelos blandos de la subrasante, usar una sola sección estructural gruesa formada por una capa de agregado de cuando menos 20 a 30 cm de espesor. Alternativamente, usar una sección estructural consistente en una capa de 10 a 30 cm de agregado para base o de roca gruesa fracturada, recubierta por una capa de entre 10 y 15 cm de espesor de agregado para superficie de rodadura revestido(Figura 12.2). Observe que los suelos tropicales blandos con alto contenido de arcilla y las cargas por llanta de vehículos pesados pueden hacer necesaria una sección estructural de mayor espesor. El espesor estructural necesario es función del volumen de tránsito, de las cargas y del tipo de suelo, y debería determinarse idealmente mediante experiencia local o con pruebas, como puede ser el uso de la prueba CBR.
- Mantener un gradiente transversal de 2-5% en el camino con pendientes hacia adentro, hacia afuera o con coronamiento para desalojar rápidamente el agua fuera de la superficie del camino (Figura 7.1). Nivelar o dar mantenimiento a la superficie de la calzada antes de que se produzcan baches, ondulaciones o roderas importantes (Figura 4.5).
- Compactar el material del terraplén, el material de superficie de rodadura o el agregado durante la construcción y el mantenimiento para lograr una superficie del camino densa y tersa a la vez con lo cual se reduce la cantidad de agua que se puede infiltrar en el camino (Foto 12.5).
- Estabilizar "puntualmente" las zonas húmedas locales y las áreas blandas con una capa de entre 10 y 15 cm de material grueso rocoso. Agregar más roca en caso necesario (Figura 12.2).
- Estabilizar la superficie del camino en zonas sensibles cercanas a arroyos y en cruces de drenaje a fin de minimizar la erosión de la superficie de rodadura.
- Controlar el exceso de polvo en el camino con agua, aceites, o troceados de madera, o use otro tipo de eliminadores de polvo.
- Mezclar el agregado grueso con un suelo fino altamente arcilloso (cuando esté disponible) para producir un material satisfactorio combinado para la calzada que sea grueso y a la vez bien graduado con 5 a 15% de finos como ligantes (Figura 12.3 y 12.4).
- Aplicar medidas de control de calidad del proyecto de construcción, mediante la observación visual y el muestreo y ensaye de los materiales, para alcanzar densidades especificadas y materiales de calidad bien graduados para el camino (Foto 12.6).
- En el caso de caminos de más altas especificaciones y de mayores volúmenes de tránsito (colectores, principales o secundarios) use materiales adecuados y redituables en cuanto a costo para superficies de rodadura como pueden ser aceites, cantos rodados, bloques de pavimentación (Foto 12.7), tratamientos superficiales asfálticos (riegos de sello) (Foto 12.8), y pavimentos de concreto asfáltico.

Foto 12.3 Un camino con necesidad de mantenimiento y superficie de rodadura. Agregue estabilización en la superficie de rodadura o aplique mantenimiento con nivelación y conformación de la superficie, para eliminar las roderas y baches, antes de que aumenten los daños importantes al camino, para lograr un buen drenaje superfial del camino y definir el cuerpo del terraplén.

Foto 12.4 Se puede usar un rodillo con nervaduras para producir material superficial adecuado, cuando la roca gruesa sea relativamente blanda. Después nivele y compacte el agregado de la superficie de calzada, para alcanzar una superficie de rodadura densa, lisa y bien drenada.

Foto 12.5 La compactación del suelo y de los agregados es generalmente la forma más barata de mejorar la resistencia y el desempeño de los materiales. La compactación resulta útil y es costo-efectivo, tanto para mejorar la estabilidad de los terraplenes de relleno, como para la superficie de rodadura.

Foto 12.6 Uso de un " densímetro nuclear " para verificar la densidad del agregado. Realice control de calidad durante la construcción, tales como pruebas de granulometría y de peso volumétrico, entre otras, para lograr las propiedades esperadas de los materiales, para el proyecto en cuestión.

Foto 12.7 Los bloques de concreto (Adoquines) o empedrados ofrecen una alternativa intermedia a las superficies de rodadura de agregados o de pavimento. Estos materiales requieren de mucha mano de obra para colocarlos y darles mantenimiento, pero resultan costo-efectivo en muchas regiones.

Foto 12.8 Compactación de una superficie con aplicación de riego de sello. Se puede usar una gran variedad de materiales de recubrimiento, dependiendo de su disponibilidad, costo y desempeño.

comprendido entre 5 y 10%, es deseable para evitar la formación de roderas y para mantener estable a la superficie de rodadura del camino. Idealmente el agregado para la **superficie de rodadura** es duro, triturado o tamizado hasta alcanzar tamaños máximos de 5 cm y está bien graduado para lograr la densidad máxima. Contiene entre 5 y 15% de ligante arcilloso para evitar el desmoronamiento, y tiene un Índice de Plasticidad de entre 2 y 10. La capa superficial aplicada al camino debe recibir mantenimiento a fin de evitar la formación de roderas y de protegerla contra la erosión. Puede tener lugar un deterioro significativo del camino cuando no es posible controlar la ocurrencia de roderas, desmoronamientos, ondulaciones o erosión superficial (Foto 12.3). Se pueden reducir en gran medida los daños si se restringe el uso del camino durante la temporada de lluvias en caso que la operación del camino permita la aplicación de esta medida.

La compactación es usualmente el método más eficiente en cuanto a costo para mejorar la calidad (resistencia e impermeabilidad) de las capas de suelo de subrasante y para mejorar el comportamiento de la capa superficial de agregados. Por lo tanto, la compactación resulta útil para proteger la inversión en los agregados para el camino, para maximizar su resistencia, para minimizar la pérdida de finos, y para evitar el desmoronamiento. Por otro lado, el comportamiento del camino ha sido excelente en algunas regiones semiáridas mediante el uso de materiales locales mezclados, normas muy estrictas de compactación, y una membrana impermeable como puede ser un riego de sello asfáltico.

La compactación puede lograrse con el menor esfuerzo si el suelo o agregado está bien graduado y si está húmedo. Idealmente, debe estár cerca del "Contenido Óptimo de Humedad", como es determinado en pruebas como las de densidad de humedad "Proctor". Los suelos expansivos deben ser compactados en el lado húmedo del óptimo. La compactación a mano puede ser efectiva, pero solo cuando se realiza en capas delgadas (2-8 cm) e idealmente con un contenido de humedad con un porcentaje un poco más alto del óptimo.

El mejor equipo para compactar suelos granulares y agregados es un rodillo vibratorio. Un rodillo de pata de cabra es más efectivo en suelos arcillosos. Un rodillo de tambor liso de acero es ideal para la compactación de la superficie de rodadura. Placas vibratorias o "wackers", son ideales en espacios confinados. Ningún equipo es ideal para todo tipo de suelos, pero el mejor equipo para todo tipo de própositos en los trabajos de compactación en la mayoría de los suelos mixtos, es un rodillo de llantas neumáticas, que proporciona una buena compactación en una amplia gama de tipos de suelos, desde agregados hasta suelos cohesivos limosos.

BANCOS DE MATERIALES

El uso de fuentes de abastecimiento de materiales locales, tales como bancos de préstamo y canteras, puede dar lugar a importantes ahorros en los costos de un proyecto, en comparación con el costo de acarreo desde fuentes lejanas (generalmente comerciales). Sin embargo, la calidad del material de bancos de préstamo o de canteras debe ser la adecuada. Las fuentes pueden ser afloramientos de roca cercanos o depósitos de material granular, adyacentes al camino, o dentro del derecho de vía. El ensanchamiento del camino o el abatimiento de la pendiente del camino en zonas rocosas fracturadas pueden producir buenos materiales de construcción en una zona que ya está afectada por las actividades de construcción. La excavación y producción de roca se puede hacer a mano (Foto 12.9), o mediante el uso de diferentes tipos de equipos, tales como cribas o trituradoras. El uso de materiales locales de costo relativamente bajo puede traer como resultado la aplicación de mayores extensiones de superficie de rodadura y de mejor protección de taludes con roca ya que los materiales están muy a la mano y no son caros. Sin embargo, los materiales de baja calidad implicarán un mayor mantenimiento del camino y pueden tener un comportamiento pobre.

En general, los bancos de préstamo y las canteras pueden producir impactos negativos importantes, incluyendo la producción de sedimentos de un área grande desgastada por erosión, un cambio en el uso del suelo, impactos en la vida silvestre, problemas de seguridad, e impactos visuales. Es por ello que la planeación del sitio de una cantera, su ubicación y su explotación deberían generalmente llevarse a cabo en combinación con un Análisis Ambiental para determinar la idoneidad del sitio y las limitaciones. Se debe

Foto 12.9 Explote canteras y bancos de préstamo (fuentes de abastecimiento de materiales) cercanos al sitio del proyecto, siempre que esto sea posible. Puede resultar adecuado hacerlo a mano o con máquinas, dependiendo de las condiciones del sitio y del ritmo de producción.

Foto 12.10 Las canteras y bancos de préstamo pueden proporcionar un recurso excelente y relativamente barato como fuente de materiales para el proyecto. Un sitio de explotación puede sólo necesitar una excavación simple, cribado o triturado, para producir los materiales necesarios. Controle el uso de la zona con un Plan de Desarrollo de Bancos.

preparar un **Plan de Desarrollo de Bancos de Materiales** para cualquier explotación de canteras o de bancos de préstamo a fin de definir y controlar el uso del sitio y de los materiales que se van a extraer. En un plan típico de desarrollo se define la ubicación del depósito de materiales; el equipo de trabajo, las áreas de almacenamiento y de extracción (Foto 12.10); los caminos de acceso; los límites de la propiedad; los recursos hídricos; la geometría final del banco y de los taludes circundantes; etc. La extracción de los materiales del banco puede dar lugar a importantes cambios a largo plazo en el uso del suelo, por lo que se necesita un buen análisis del sitio.

Los depósitos fluviales de gravas o los depósitos de terrazas de ríos generalmente se usan como bancos de materiales. Idealmente, los depósitos en los arroyos o en los ríos o cercanos a éstos no deberán usarse. La extracción de grava en cauces de arroyos con corriente puede causar daños importantes a la vía fluvial, tanto en el lugar como aguas abajo (o aguas arriba) del sitio. Sin embargo, puede ser razonable retirar ciertos materiales del canal previo estudio adecuado del sistema fluvial y teniendo cuidado en la operación. Algunos depósitos en barras de grava o en terrazas pueden resultar adecuados como bancos de materiales, sobre todo si están por encima del canal activo. El equipo no se debe operar dentro del agua.

La regeneración del sitio es por lo general necesaria una vez

concluida la extracción de los materiales, y la rehabilitación deberá formar parte integral del desarrollo del sitio. El trabajo de regeneración se debería identificar y definir en un **Plan de Recuperación de Bancos.** El trabajo de rehabilitación puede incluir la conservación y la colocación de una nueva capa vegetal, la reconfiguración del banco, la reforestación, el drenaje, el control de la erosión y las medidas de seguridad. Con frecuencia deben tomarse en cuenta aspectos como el uso provisional del sitio, la clausura y el nuevo uso en el futuro. Un sitio se puede explotar durante muchos años, pero se puede clausurar entre proyectos, por lo que es posible llegar a necesitar actividades provisionales de recuperación. Las zonas de préstamos a los lados del camino se usan comúnmente como fuentes de abastecimiento cercanas y económicas de materiales (Foto 12.11). Estas zonas deberían estar idealmente ubicadas fuera de la vista del camino y en ellas también se necesita el trabajo de recuperación después de su explotación.

La calidad del material local puede ser variable o marginal, y para usar materiales locales con frecuencia se necesita un proceso adicional o control de calidad. Material de baja calidad se puede producir a un costo mucho menor que el de material disponible comercialmente, pero su comportamiento no será tan bueno. Se tendrán que separar las zonas con buenos materiales de las que tienen malos materiales. Sin embargo, el uso de materiales locales puede ser muy recomendable y redituable, en cuanto a costos.

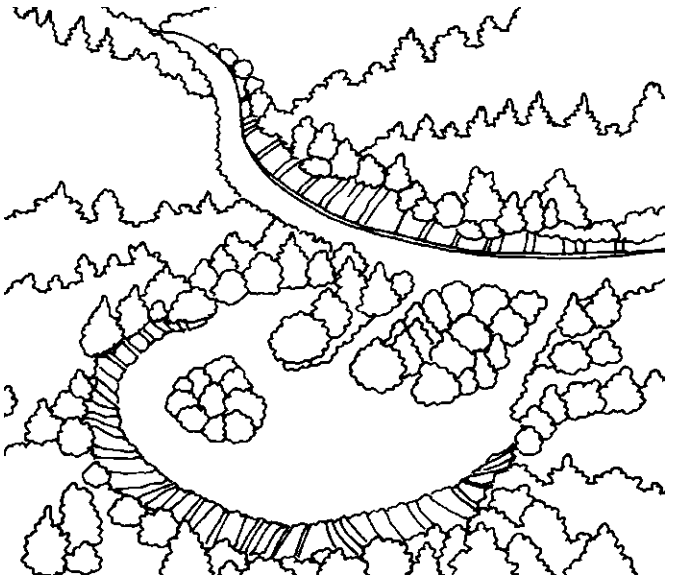
Prácticas Recomendadas

- Desarrollar localmente bancos de préstamo, canteras y fuentes de abastecimiento de materiales en bruto siempre que resulte práctico en el sitio de un proyecto. Asegurarse de que se ha llevado a cabo un Análisis Ambiental para el establecimiento de nuevas fuentes de abastecimiento de materiales.
- Usar un **Plan de Desarrollo de Bancos** para definir y controlar el uso de materiales locales. En un Plan de Desarrollo de Bancos se debería incluir la ubicación del sitio, la extensión de la explotación, la excavación, las áreas de almacenamiento y de trabajo, la geometría del banco, el volumen de material utilizable, las limitaciones del sitio, una vista en planta, las secciones transversales de la zona, etc. En el plan se deberían también considerar las clausuras provisionales o temporales así como las operaciones futuras.
- Preparar un **Plan de Recuperación de Bancos** en combinación con la planeación del banco para devolverle a la zona otros usos productivos en el largo plazo. En un Plan de Recuperación de Bancos se debería incluir información como la de conservación y reaplicación de la capa vegetal, la configuración final, las necesidades de drenaje, la reforestación y las medidas de control de erosión (Foto 12.12).
- Reconfigurar, reforestar y controlar la erosión en bancos de préstamo a los lados del camino para minimizar sus impactos visuales y ambientales (Figura 12.5). De preferencia, localizar las fuentes de abastecimiento de materiales, ya sea dentro del derecho de vía del camino o fuera de la vista de la calzada.
- Mantener el control de calidad del proyecto mediante ensayo de materiales para garantizar la producción de materiales de calidad adecuada en canteras y en bancos de préstamo.

Prácticas Que Deben Evitarse

- Operaciones de extracción de gravas dentro del cauce del arroyo y sobre todo el trabajo con equipos dentro del arroyo.
- Explotación de fuentes de abastecimiento de materiales sin planificación y sin poner en práctica medidas de recuperación.
- Uso de materiales de baja calidad, cuestionables o no probados sin una investigación y ensayos previos.

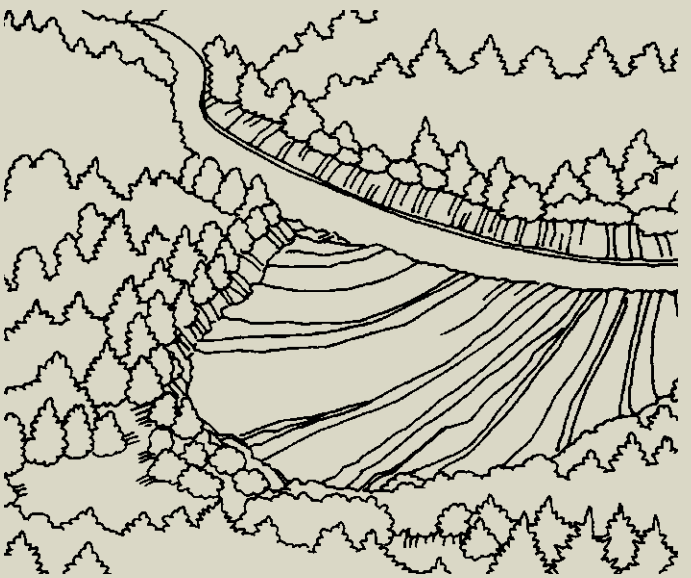
Figura 12.5 Buenas y malas prácticas para la explotación de canteras o bancos laterales. (Adaptado de Visual Quality Best Management Practices for Forest Management in Minnesota, 1996)



Prácticas adecuadas para la explotación de canteras

¡Lo que debe hacerse!

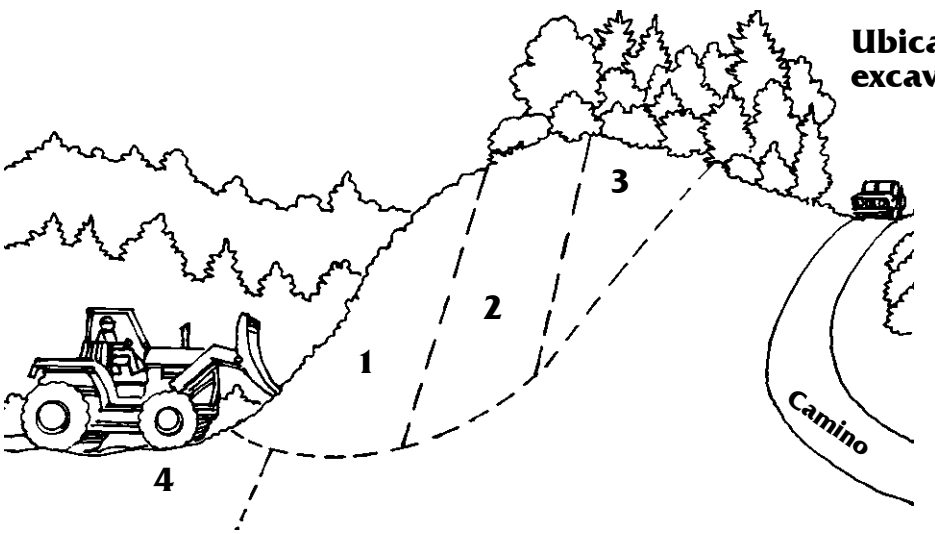
- Oculte la excavación y la zona de la salida de la vista del camino
- Deje taludes suaves
- Reconfigure y nivele la zona
- Deje zonas de vegetación
- Siembre y aplique cubiertas de vegetación en la zona
- Use medidas de control del drenaje
- Restituya la capa de suelo orgánico



Prácticas inadecuadas o malas para la explotación de canteras

¡Lo que NO debe hacerse!

- Dejar expuestas zonas abiertas extensas
- Dejar la zona desgastada por la erosión
- Dejar taludes verticales o escarpados



Ubicación ideal y secuencia de excavación

Ubique las zonas de préstamo fuera de la vista del camino.
(NOTA: La altura segura de excavación de una ladera dependerá del tipo de suelo. Mantenga el talud excavado a una baja altura, con cierta pendiente o terrazas, por razones de seguridad.)

Foto 12.11 Esta zona de préstamo al lado del camino carece de control de drenaje y de la erosión. El desarrollo de bancos a un lado del camino puede resultar económico y útil, pero las áreas deben esconderse si es posible, y la zona deber rehabilitarse una vez concluido el proyecto.

Foto 12.12 Un banco de préstamo que ha sido rehabilitado y reforestado. Reconfigure, drene y restaure los bancos de préstamo y las canteras, una vez que se han explotado los materiales útiles y el uso de la zona ha terminado.

Capítulo 13

Control de la Erosión

"Control de la erosión: una de las mejores y de las más económicas medidas para proteger el camino y el medioambiente. ¡Hágalo!"

El control de la erosión es fundamental para la protección de la calidad del agua (Foto 13.1). Las prácticas de estabilización de suelos y de control de la erosión son necesarias y se deben usar en zonas donde el suelo esté expuesto y la vegetación natural resulte inadecuada. El terreno desgastado por la erosión debería cubrirse, típicamente con pasto de semilla y con alguna forma de esteras o de cubierta vegetal. Esto ayudará a prevenir la erosión y el arrastre subsecuente de sedimentos hacia los arroyos, lagos y humedales. Este desplazamiento de los sedimentos puede ocurrir durante la construcción del camino y después de ésta, posterior al mantenimiento de la vía, durante actividades de explotación minera o forestal, mientras el camino está en uso (está activo). Si un camino se cierra pero no se estabiliza, o como resultado de prácticas inadecuadas de administración de la tierra cerca del camino (Foto 13.2). En términos generales, la mitad de la erosión de una operación de tala de árboles, por ejemplo, proviene de los caminos. Además, la mayor parte de la erosión ocurre durante la primera temporada de lluvias posterior a la construcción. Las medidas de control de la erosión necesitan ponerse en práctica inmediatamente después de terminada la construcción y cada vez que haya una alteración en la zona. Los modelos de predicción de la erosión tales como el WEPP (Water Erosion Prediction Project) o el RUSLE (Revised Unified Soil Loss Equation) se pueden aplicar para cuantificar la erosión y para comparar la efectividad de diversas medidas de control de la erosión. El flujo de agua concentrado puede iniciarse como un flujo laminar pequeño, producir riachuelos, y eventualmente dar lugar a la formación de una quebrada importante (véase el Capítulo 14).

Entre las prácticas de control de la erosión se incluye la protección de la superficie y la cobertura del terreno con redes

Foto 13.1 No deje las zonas alteradas o desgastadas por la erosión expuestas a la lluvia y escurrimientos. Emplee medidas de control de la erosión para proteger la zona y cuidar la calidad del agua.

Foto 13.2 Erosión producida en un talud adyacente a una carretera, debida a la falta de vegetación o a un inadecuado uso del suelo. Observe que la vegetación está evitando la erosión junto a la carretera.

(Foto 13.3), material vegetal o desperdicio vegetal (Foto 13.4), roca, etc.; la instalación de estructuras para el control del agua y de los sedimentos; la colocación de cubierta vegetal, la siembra de pasto y diversas formas de reforestación, como se aprecia en las Figuras 13.1 a 13.4. Para el control efectivo de la erosión hay que poner atención especial a los detalles y para el trabajo de instalación hace falta inspección y control de calidad. Mediante los **métodos físicos**, tales como cunetas revestidas (Foto 13.5), bermas, troceados de madera, esteras de protección del terreno y barreras contra azolves o sedimentos (Foto 13.6), se controla o se encauza el flujo del agua, se protege a la superficie del terreno contra la erosión, o se modifica la superficie del suelo para hacerla más resistente a la erosión (Foto 13.7). Los **métodos de vegetación** en los que se emplean pastos, maleza y árboles, ofrecen cobertura al terreno, resistencia producida por las raíces, y protección del suelo con vegetación "natural" económica y estética, al mismo tiempo que ayudan a controlar el agua y a promover la infiltración (Foto 13.8). Idealmente, la vegetación debería seleccionarse por sus buenas propiedades de crecimiento, resistencia, cobertura densa del terreno, y raíces profundas para estabilización de taludes. Las especies locales nativas que tengan las propiedades antes mencionadas se deberían usar preferentemente. Sin embargo, ciertos pastos como el tipo Vetiver, se han usado ampliamente en todo el mundo debido a sus fuertes y profundas raíces, su adaptabilidad y sus propiedades no agresivas (Foto 13.9). Los **métodos biotécnicos** (tales como capas de maleza, estacas vivas y arbustos en hilera) ofrecen una combinación de estructuras con vegetación para impartir protección física así como un apoyo adicional a largo plazo para las raíces y aspectos estéticos (Foto 13.10).

Un **Plan de Control de la Erosión** y el empleo de medidas de control de la erosión deberían formar parte integral de cualquier proyecto de construcción de caminos o de explotación de recursos. La mayoría de las zonas alteradas, incluyendo plataformas de carga, patios de almacenamiento durante la construcción, caminos de ar-

Foto 13.3 Cubra los taludes de terraplenes, sitios de trabajo y otras áreas expuestas del suelo con paja, redes, roca u otro tipo de materiales, a fin de proteger el terreno y promover el crecimiento de la vegetación.

Tabla 13.1

Elementos Clave de un Plan de Control de la Erosión y de Revegetación para Proyectos de Construcción de Caminos

A. Descripción del Proyecto

1. Objectivos del proyecto
2. Ubicación del proyecto
3. Descripción del ambiente local

B. Planificación

1. Análisis del sitio
    a. Clima y microclima
    b. Opciones de vegetación
    c. Suelos y fertilidad
2. Desarrollo del plan de reforestación
    a. Especies de plantas adecuadas
    b. Preparación del suelo y del sitio
    c. Estética vs. necesidades de control de la erosión
    d. Uso de especies "Nativas" locales

C. Implementación

1. Métodos de cultivo — Estacas y transplantes
    a. Herramientas y materiales
    b. Agujeros y métodos para sembrar
2. Métodos para sembrar —Semillas y cubiertas vegetales
    a. Siembra al voleo, a mano o siembra hidráulica
    b. Perforación en serie
    c. Tipo / Cantidad de semilla
    d. Tipo / Cantidad de cubierta vegetal y de fertilizante
    e. Fijación de la cubierta con tachuelas o redes
3. Protección de las plantas
    a. Jaulas de alambre alrededor de las plantas
    b. Cercas alrededor de todo el sitio
4. Mantenimiento y cuidado después de la siembra
    a. Riego
    b. Control de plagas
    c. Fertilización
5. Métodos biotécnicos para sembrar
    a. Juncos
    b. Capas de maleza o esteras de maleza
    c. Estacas vivas

D. Obtención de plantas y manejo de materiales para plantas

1. Programación y planeación
    a. Siembra en otoño o en primavera
    b. Siembras en verano
2. Tipos de materiales para plantas
    a. Estacas
    b. En Tubos
    c. Otras plantas de maceta
3. Endureceimiento y sostenimeinto de plantas (Aclimatación)
4. Manejo de plantas vivas y de estacas

rastre, rellenos de caminos, algunos cortes para caminos, cunetas de drenaje, bancos de préstamo, la superficie del camino y otras áreas de trabajo, deberían recibir tratamiento para controlar la erosión. Resulta más redituable en cuanto a costos y más efectivo prevenir la erosión que reparar el daño o retirar el sedimento de los arroyos, lagos o aguas subterráneas.

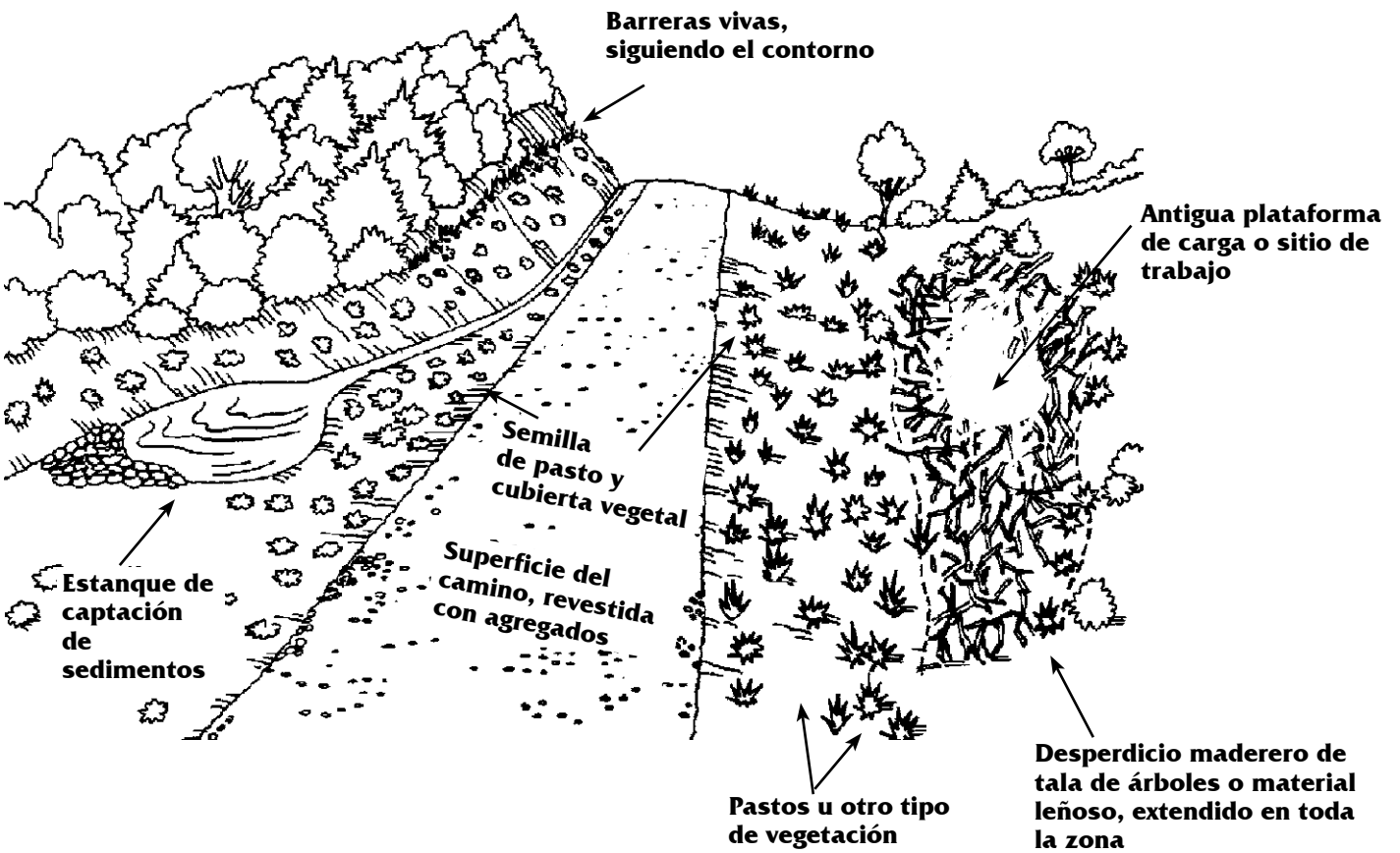
Entre los elementos de un Plan de Control de la Erosión y de Reforestación, se incluye la ubicación y las condiciones climáticas del proyecto; los tipos de suelos; el tipo de medidas de control de la erosión; la programación de la aplicación de las medidas de control de la erosión con vegetación; el origen de las semillas y de las plantas; los métodos de siembra, etc. En la Tabla 13.1 se presentan los variados aspectos de planeación, implantación y cuidado que intervienen en un plan de control de la erosión para proyectos de caminos.

Prácticas Que Deben Evitarse

- Alteración innecesaria de grandes extensiones.
- Dejar sin protección contra la erosión al suelo nativo después de una nueva construcción o de haber alterado el terreno.
- Movimientos de tierras y actividades de construcción de caminos durante periodos de lluvia o en el invierno

Figura 13.1 Uso de vegetación, material leñoso y roca para controlar la erosión y para proteger el terreno. (Adaptado de Wisconsin's Forestry BMP for Water Quality, 1995)

Vista en Perspectiva



Sección Transversal

Entre los diversos controles de la erosión con cubiertas, se incluye la siembra de semillas de pasto y paja, de pastos y otros tipos de retenedores de humedad, vegetación, rocas, desperdicio maderero, astillas, troceados de madera y hojas.

Photo 13.4 Zona de trabajo alterada y cubierta con materiales leñosos, como maleza del desmonte o desperdicio vegetal de la explotación forestal. Asegúrese de que el material está aplastado firmemente contra el terreno.

Foto 13.5 Cuneta a un lado del camino, revestida con rocas bien graduadas para el control de la erosión.

Foto 13.6 Barreras contra azolves (para control de sedimentos), barreras de vegetación viva o barreras de maleza, se pueden usar para controlar el arrastre de sedimentos sobre los taludes (véase también la Foto 6.6).

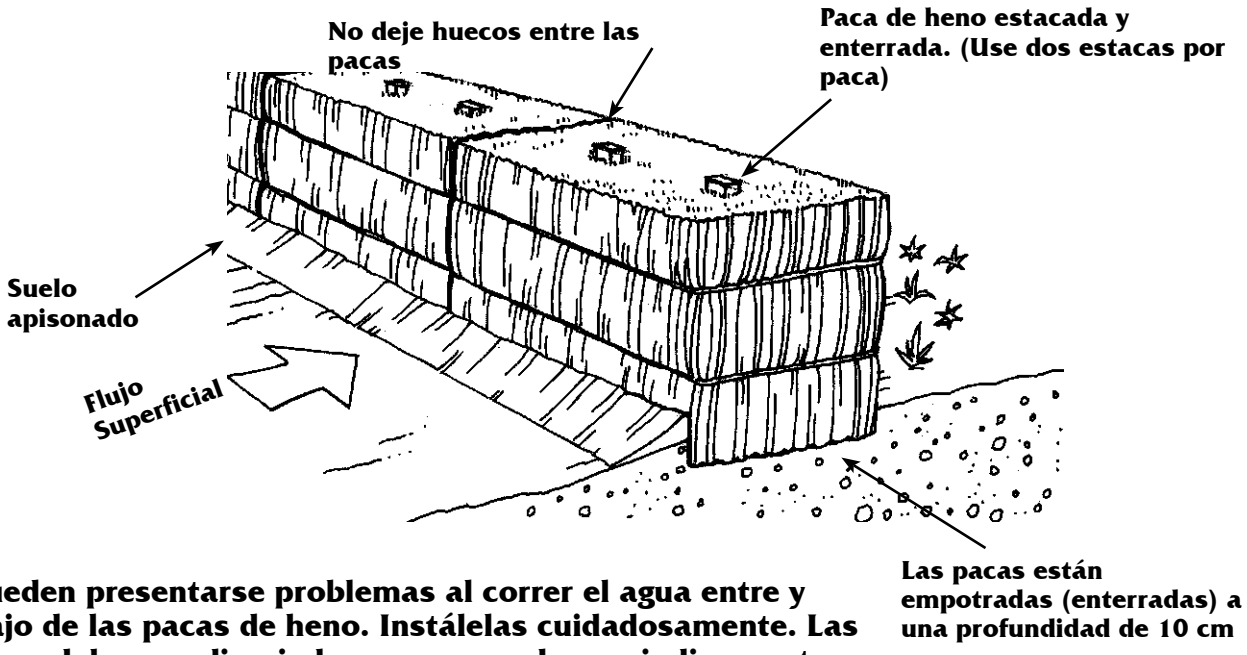
Foto 13.7 Protección de enrocamiento, colocada sobre el talud de un relleno de suelo erosionable adyacente a un arroyo, que se usa para un control durable y permanente contra la erosión.

Foto 13.8 Semillas y cubierta vegetal (capas para protección de semillas y para retención de la humedad) aplicados a la superficie del terreno natural, para promover el crecimiento de pasto sobre zonas desgastadas, caminos cerrados y en suelos erosionables.

Foto 13.9 Uso de pasto Vetiver para estabilización de taludes y control de la erosión. Seleccione vegetación que se adapte al sitio, que tenga raíces fuertes, y que proporcione una buena cobertura del terreno. De preferencia usar especies nativas.

Figura 13.2 Estructuras para el control de la sedimentación usando pacas de paja o barreras contra azolves. ¡Observe que las pacas de paja se deben instalar correctamente y anclarse al terreno!. (Adaptado de Wisconsin's Forestry BMP for Water Quality.)

A. Pacas de heno (o atados de pasto)



Nota: Pueden presentarse problemas al correr el agua entre y por debajo de las pacas de heno. Instálelas cuidadosamente. Las estructuras deben ser limpiadas y conservadas periodicamente.

B. Barreras contra azolves

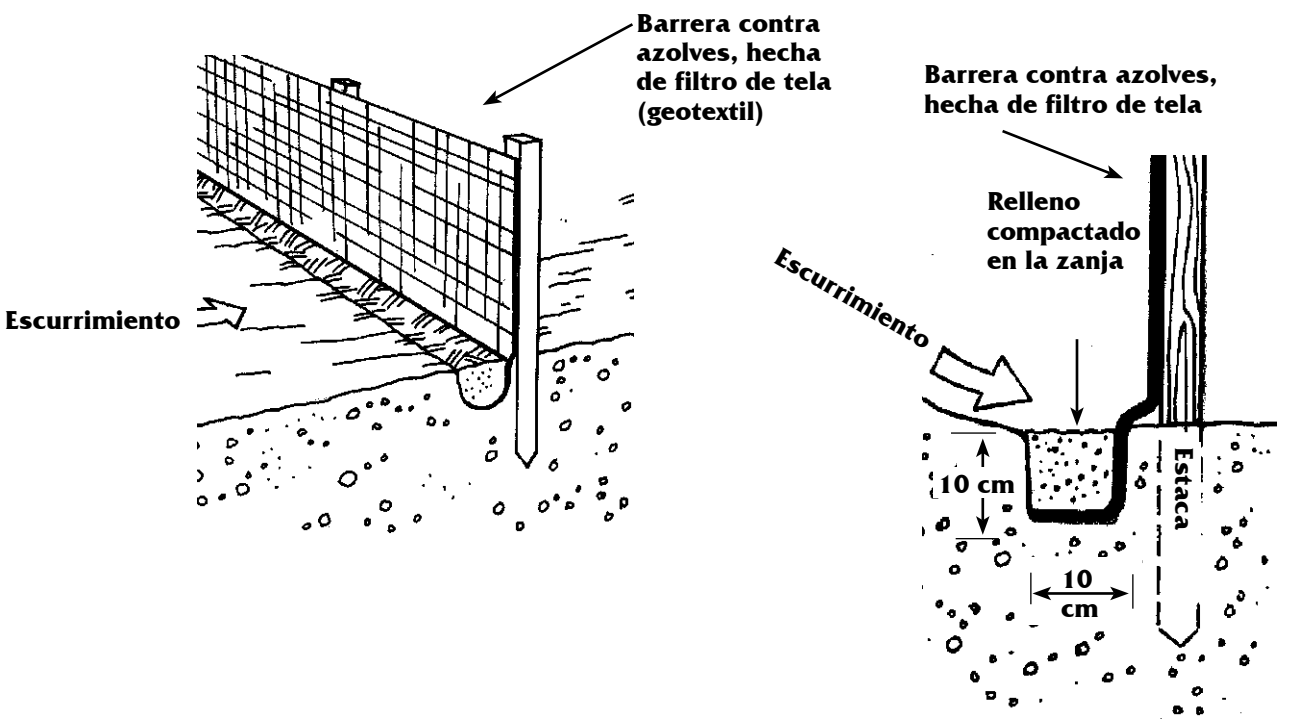
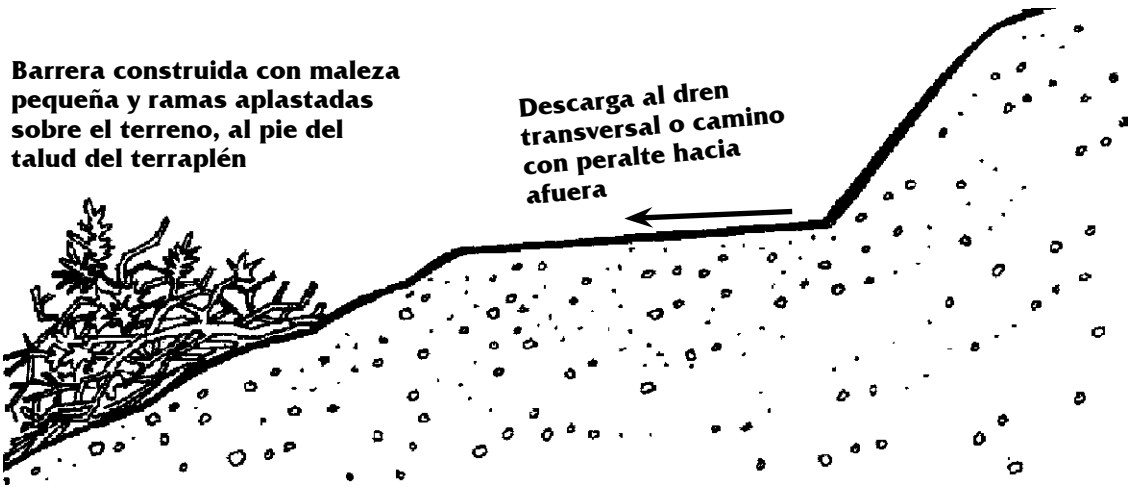
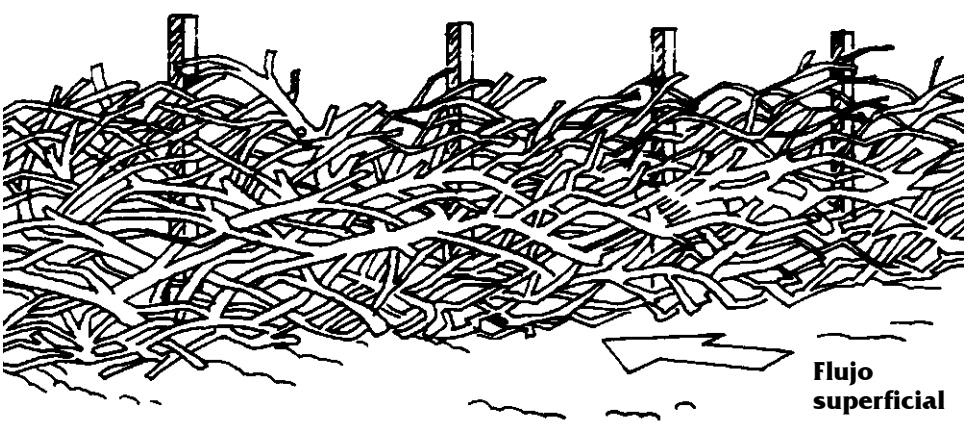


Figura 13.2 (continuación) Estructuras para el control de sedimentos usando barreras y cercas de maleza.

c. Barrera de maleza



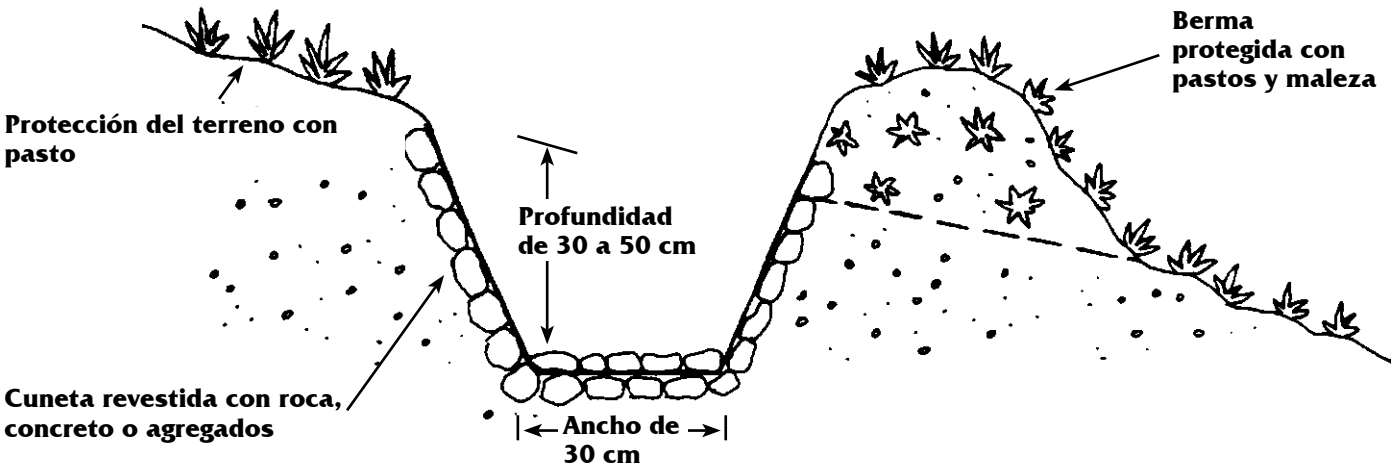
d. Cerca de maleza



Cerca de maleza, enterrada 10 cm dentro del suelo.

Figura 13.3 Estructuras para el control del agua.

A. Control del agua mediante cunetas y/o bermas



B. Control del agua con barreras de vegetación (y terrazas). (Adaptado de Vetiver, 1990)

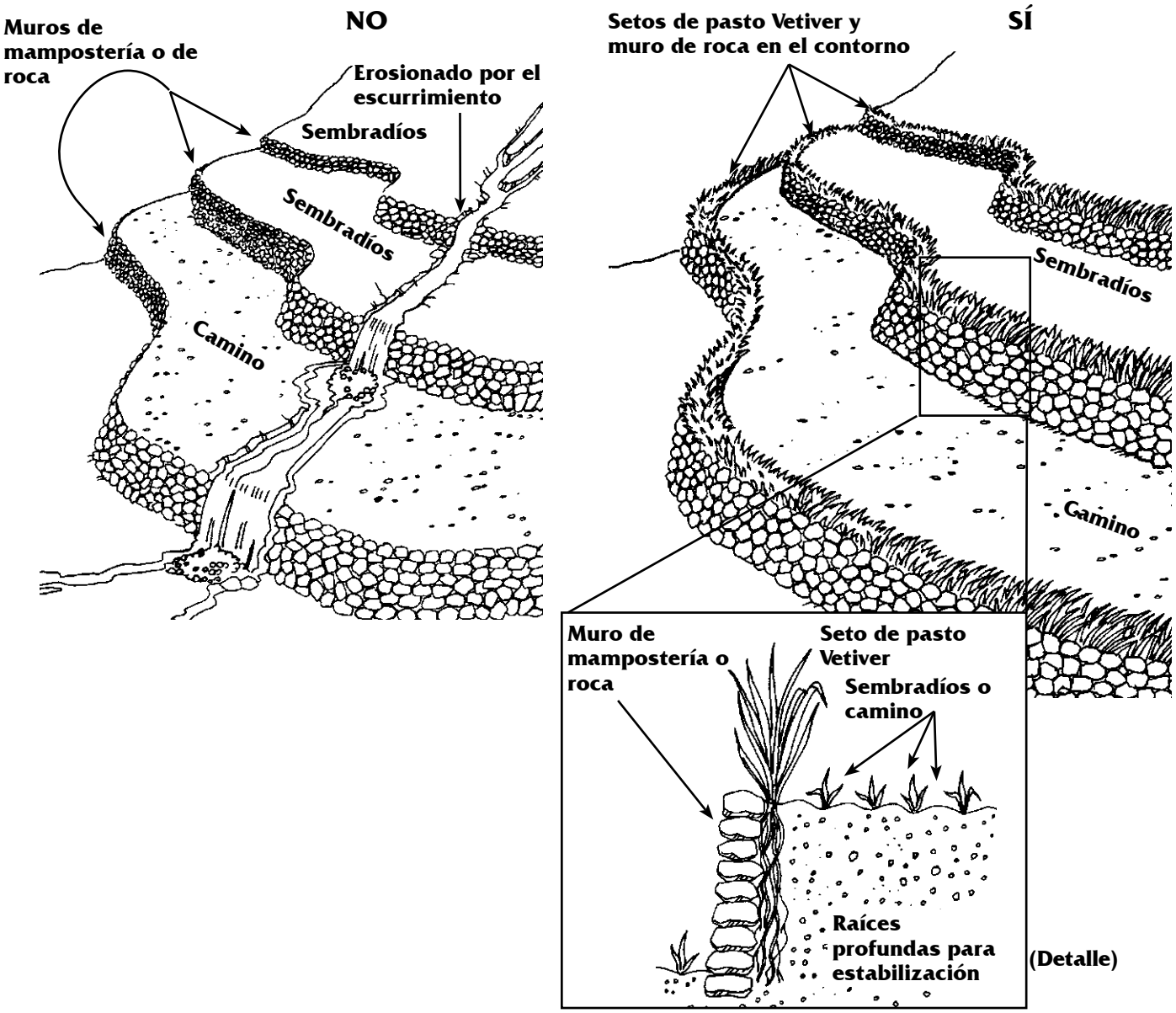


Foto 13.10 Uso de pastos, plantados en hileras, para proporcionar estabilidad a la superficie del talud y control de la erosión en cortes escarpados del camino.

Foto 13.11 Barreras de vegetación viva (arbustos en hilera) usando pastos tipo Vetiver y otros tipos de vegetación, colocados sobre las curvas de nivel para evitar la erosión descendente de taludes desde zonas desgastadas o alteradas.

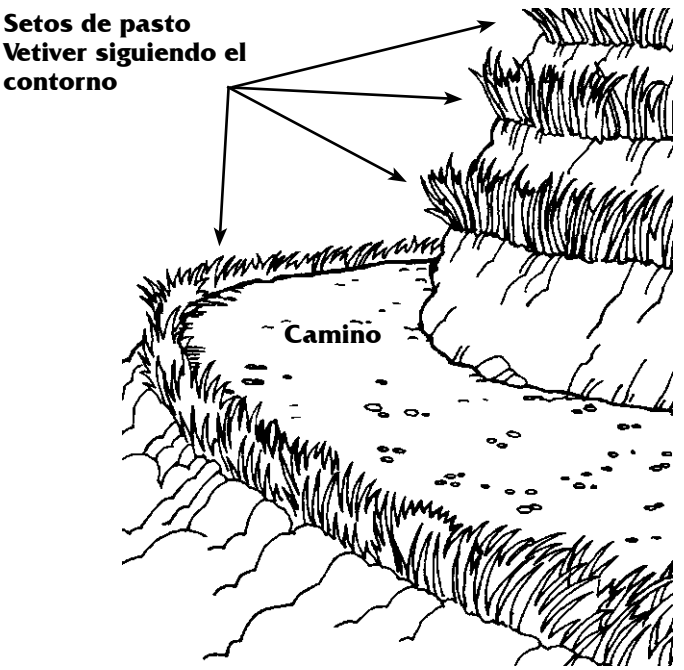
Foto 13.12 Vivero local, desarrollado en conjunto con un proyecto de construcción, para proporcionar una fuente de abastecimiento de plantas y vegetación crecida (preferentemente nativa), apropiadas para los trabajos de control de la erosión.

Prácticas Recomendadas

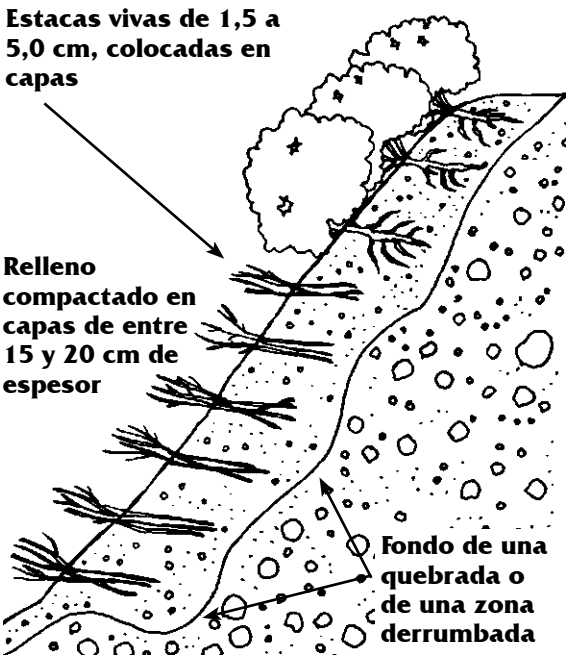
- Desarrollar para cada proyecto un Plan de Control de la Erosión que contenga las necesidades provisionales y definitivas de control de la erosión, las acciones específicas, y la manera de poner en práctica o de instalar dichas acciones. Preparar planos típicos para trampas de sedimentos, setos contra sedimentos, barreras de maleza, cubiertas del suelo, diques de detención, cunetas revestidas y medidas biotécnicas.
- Alterar lo menos posible el área del terreno, estabilizar esa área tan pronto como sea posible, controlar el drenaje a través del terreno, y atrapar los sedimentos en el lugar.
- Conservar la capa vegetal con sus desechos de hojas y materia orgánica y volver a colocar este material en zonas locales alteradas para promover el crecimiento de la vegetación nativa local.
- Aplicar semillas de pasto local nativo y una cubierta vegetal en las zonas desgastadas con suelos erosionables o en la superficie de los caminos cerrados. El material para la cubierta vegetal puede ser paja, troceados de madera, corteza, maleza, hojas y ramas, papel picado, grava, etc. (Figura 13.1).
- Aplicar medidas de control de la erosión antes del inicio de la temporada de lluvias y después de cada temporada de construcción, de preferencia inmediatamente después de la construcción. Instalar medidas de control de la erosión conforme se va terminado cada tramo del camino.
- Cubrir las zonas alteradas o erosionables con ramas, copas de árboles y desechos de madera tales como desperdicio maderero de corte de árboles colocado en el contorno y aplastado para lograr un buen contacto con el suelo (Figura 13.1).
- Instalar estructuras para el control de sedimentos donde haga falta para disminuir la velocidad del escurrimiento o para reorientarlo y para atrapar sedimentos mientras crece la vegetación. Entre las estructuras de control de sedimentos se incluyen camellones de desperdicio maderero de talas, bermas de roca, cuencas de captación de sedimentos, pacas de paja, setos de maleza, y barreras contra azolves (véanse las Figuras 13.1, 13.2a y 13.2b).
- Controlar el flujo de agua a través de los sitios de construcción o de las zonas alteradas mediante cunetas, bermas, estructuras de detención, barreras de pastos naturales, roca, etc. (Figura 13.3).
- Colocar camellones de troncos o maleza de desmonte a lo largo del pie de los taludes de relleno de la calzada (véanse Figura 4.2).
- Estabilizar los taludes de cortes y de rellenos, los rellenos de astillas, las zonas altas desgastadas, o las quebradas con capas de maleza, estructuras de roca con estacas vivas, setos vivos en hilera (Foto 13.11), juncos, u otro tipo de medidas biotécnicas (Figura 13.4).
- Mantener y volver a aplicar medidas de control de la erosión hasta que crezca la vegetación. Realizar pruebas de químicas en el suelo en caso necesario para determinar los nutrientes del suelo disponibles.
- Usar fertilizantes en zonas con suelos pobres carentes de los nutrientes necesarios para promover un crecimiento más rápido y lograr un mejor control de la erosión. El fertilizante sólo deberá usarse cuando se necesite. Agregar agua o riego únicamente en caso necesario para hacer crecer inicialmente la vegetación.
- Desarrollar fuentes locales de plantas y viveros para contar con materiales de origen vegetal para el control de la erosión. Usar especies nativas locales (ni exóticas ni invasoras) siempre que sea posible (Foto 13.12). Seleccionar especies adecuadas para el uso, el sitio y el entorno biológico.

Figura 13.4 Medidas biotécnicas para la estabilización de taludes.

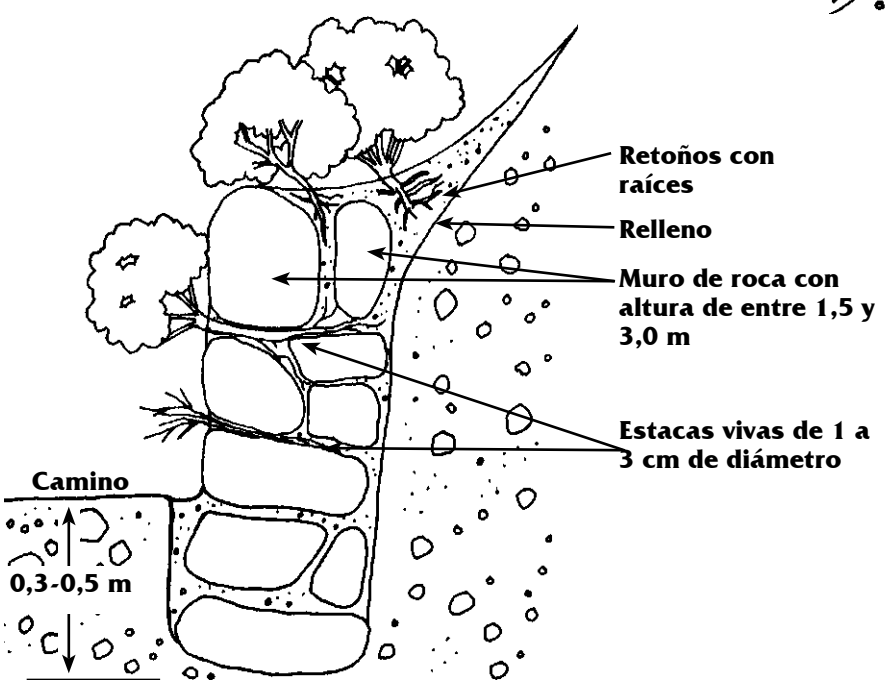
A. Arbustos siguiendo el contorno
Para estabilización de taludes (Adaptado de Vetiver, 1990)



B. Capas de maleza
Para estabilización de quebradas y deslizamientos



C. Muros de retención vivos
Construidos con roca o gaviones y vegetación



Capítulo 14

Estabilización de Quebradas

"Un gramo de control de la erosión y estabilización de quebradas puede prevenir un kilogramo de pérdida de sedimentos."

Las quebradas (o cárcavas, barranquillas) constituyen una forma específica de erosión severa causada típicamente por el flujo concentrado de agua actuando sobre suelos erosionables. En la Figura 14.1 se muestra una quebrada típica en una ladera y la manera en que puede afectar a un camino y al uso del suelo. El flujo concentrado de agua se puede iniciar como un flujo laminar pequeño, para luego producir riachuelos y a la larga dar lugar a la formación de una quebrada importante. Las quebradas pueden afectar en gran medida una cierta zona al dejar improductiva una parte del terreno y al abatir el nivel de aguas freáticas, y además constituir una fuente importante de generación de sedimentos (Foto 14.1). Pueden ser producidas por el flujo concentrado de agua que escurre fuera de los caminos o pueden afectar a los caminos al requerir cruces adicionales de desagüe y un mantenimiento más frecuente.

Una vez formadas, las quebradas se agrandan con el tiempo y seguirán su proceso de socavación hasta que lleguen al material resistente. También se amplían lateralmente a medida que se profundizan. Con frecuencia las quebradas se forman a la salida de las alcantarillas o de los drenes transversales debido a los flujos concentrados y a las velocidades relativamente rápidas del agua

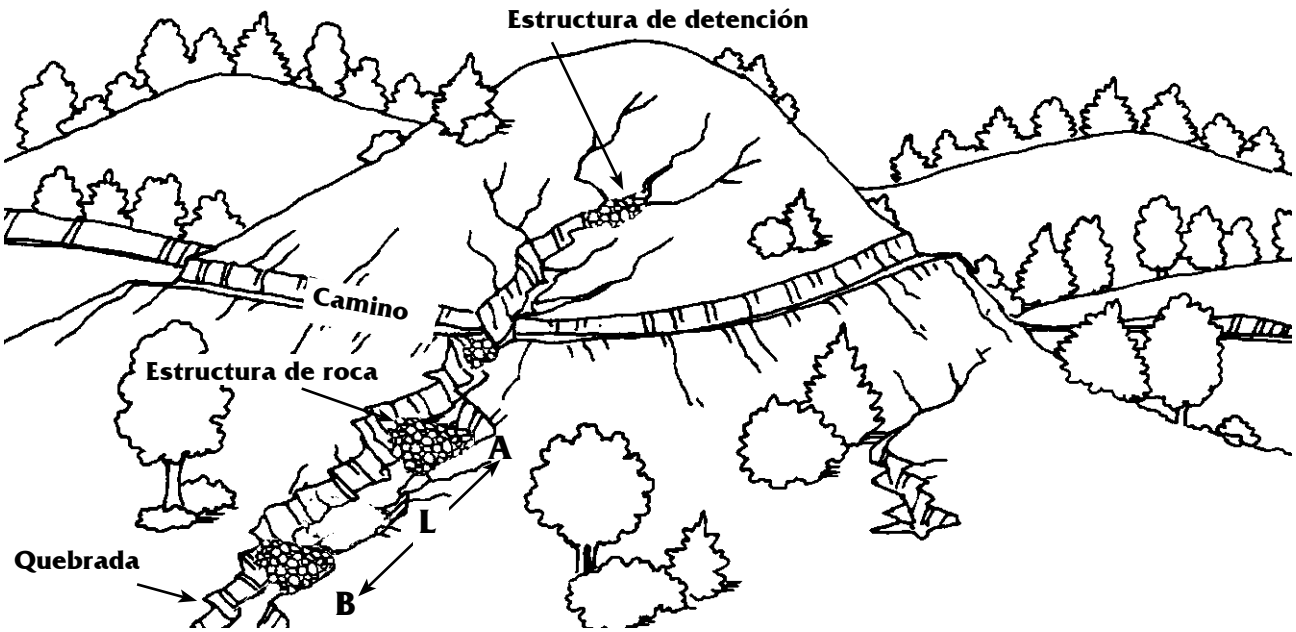


Figura 14.1 Una quebrada (cárcava) causada por, o que afecta a un camino.

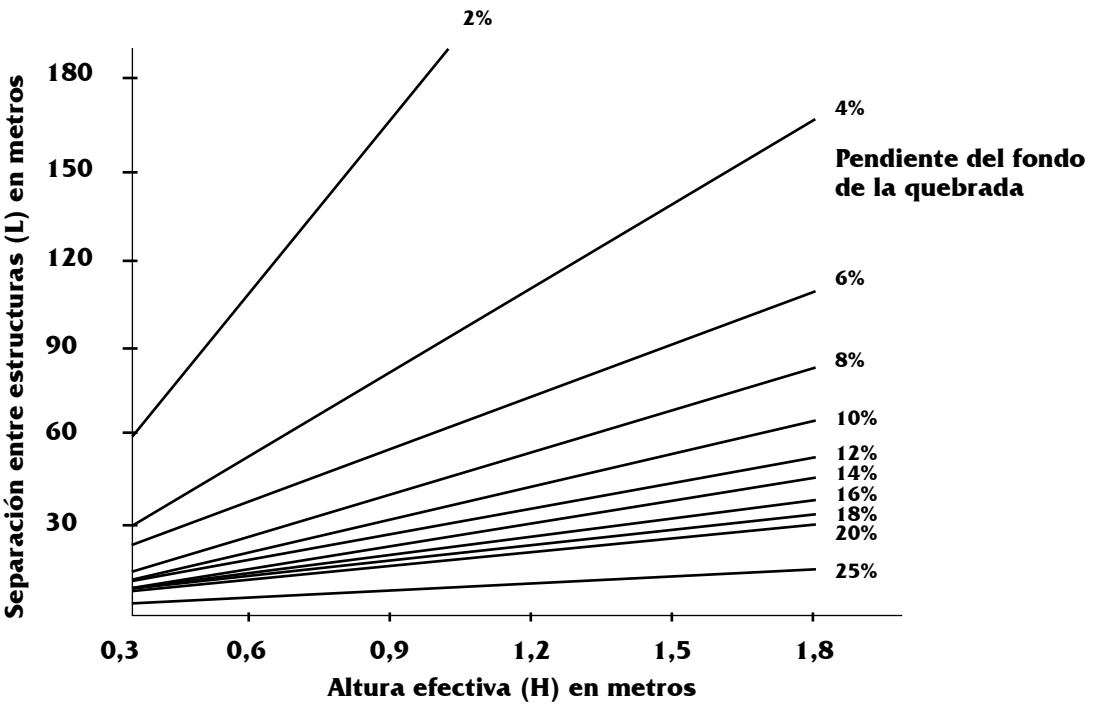
Foto 14.1 Quebrada típica producida por agua concentrada sobre suelos erosionables y/o por prácticas inadecuadas de uso de suelo.

en movimiento. Por otro lado, las quebradas se pueden formar cuesta arriba de los tubos de alcantarillas, sobre todo en praderas, cuando el tubo se coloca por debajo de la elevación de la pradera. Esto ocasiona una caída en la elevación de la pradera o del canal y el subsecuente avance hacia delante de la quebrada. Las quebradas que se forman a través de praderas con frecuencia abaten el nivel local del agua subterránea y pueden llegar a secar la pradera.

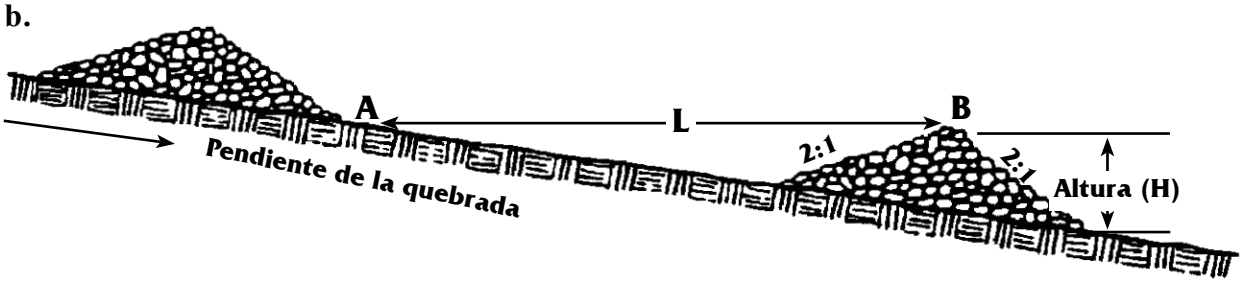
Para la estabilización de quebradas generalmente se necesita la

Figura 14.2 Detalles de separación de las estructuras de control de quebradas. (Adaptado de D. Gray and A. Leiser, 1982)

a.



b.



L= Distancia suficiente entre los puntos A y B, de tal manera que los dos diques tengan la misma elevación (entre el pie de uno y la corona del otro).

Nota: Use una pendiente de 2:1 o más tendida para los diques de roca.

eliminación o la reducción de la fuente de agua que fluye a través de la quebrada para luego rellenar de nuevo la quebrada mediante la colocación de diques, o presas pequeñas, a intervalos determinados a lo largo de la quebrada. También podrá hacer falta la reconfiguración y la estabilización de las paredes demasiado escarpadas. Las estructuras típicas para la estabilización de quebradas se construyen con roca, gaviones, troncos (Foto 14.2), estacas de madera con malla de alambre o con maleza, bambú, barreras de vegetación, etc. Los métodos biotécnicos ofrecen una combinación de una estructura física con medidas de vegetación para la protección física así como para un soporte adicional de las raíces a largo plazo y para mejorar el aspecto estético. También se necesitará en general una estructura de retención para estabilizar la pendiente ascendente, es decir, la parte superior de la quebrada y evitar el futuro avance hacia adelante (véase la Figura 14.1).

La separación recomendada entre estructuras depende de la pendiente del terreno o del canal de la quebrada, y de la altura de cada una de las estructuras, como se observa en la Figura 14.2. En la Figura 14.2a se muestra la separación ideal necesaria entre estructuras en función de la pendiente del canal y de la altura de la estructura. En la Figura 14.2b se presenta la relación física entre la altura de la estructura y la separación en un canal inclinado de tal manera que el agua y el material retenidos por la estructura inferior está a nivel con el pie de la estructura superior. De esta manera el agua desbordará sobre la estructura superior para

Foto 14.2 Uso de troncos para crear estructuras de estabilización de quebradas en una área afectada por incendios. Presas físicas o vegetales (diques o estructuras de retención de sedimentos) pueden ser usadas para controlar los sedimentos y estabilizar las quebradas. Evite la concentración de agua, antes de que se formen las quebradas.

Estabilización Exitosa de Quebradas

Entre los detalles importantes para diseñar estructuras exitosas para estabilización de quebradas, según se muestra en las Figuras 14.2 y 14.3, se incluyen las siguientes:

- Colocar un cimacio, ya sea dentado o en forma de "U", en la parte superior de la estructura para mantener el flujo de agua concentrado a la mitad del cauce;
- Acuñar con precisión la estructura en las márgenes adyacentes y con una longitud suficiente para evitar la erosión alrededor de los extremos de las estructuras (Foto 14.3);
- Empotrar las estructuras con suficiente profundidad en el canal para evitar el flujo **por debajo** de la estructura;
- Desbordar el agua sobre la estructura para descargarla en un vertedero de protección contra derrames, en una capa de enrocamiento de protección o en un estanque de agua a fin de evitar la socavación y el arrastre de la cimentación de la estructura;
- Colocación de las estructuras muy cercanas entre sí para que el flujo por encima de la estructura derrame en el agua estancada represada por la estructura inmediatamente aguas abajo (Figura 14.2).

Nota: La roca comúnmente usada en diques de detención de roca suelta deberá ser dura, durable, bien graduada con finos, y de tamaño suficiente para resistir el movimiento. A continuación se presenta una granulometría que se usa comúnmente.

Tamaño (cm)	Porcentaje que pasa
60 cm	100
30 cm	50
15 cm	20
6 cm	10

Prácticas Que Deben Evitarse

- Dejar las quebradas sin protección contra erosión progresiva.
- Instalar estructuras de diques de detención con una parte superior recta y plana, sin protección contra la socavación, y sin empotrarse perfectamente en las márgenes.

Foto 14.3 Una estructura costosa pero inútil de gaviones de control de formación de quebradas, que no se anclaron debidamente en las márgenes de las mismas, y tampoco se mantuvo el flujo por encima de la parte media protegida por la estructura.

Foto 14.4 Construya las estructuras de retención de escombros y estabilización de quebradas (por ejemplo, presa o diques) con un vertedero para mantener el flujo por encima de las parte media de la estructura, coloque protección a la salida de cada estructura y ancle las estructuras en las márgenes de suelo firme.

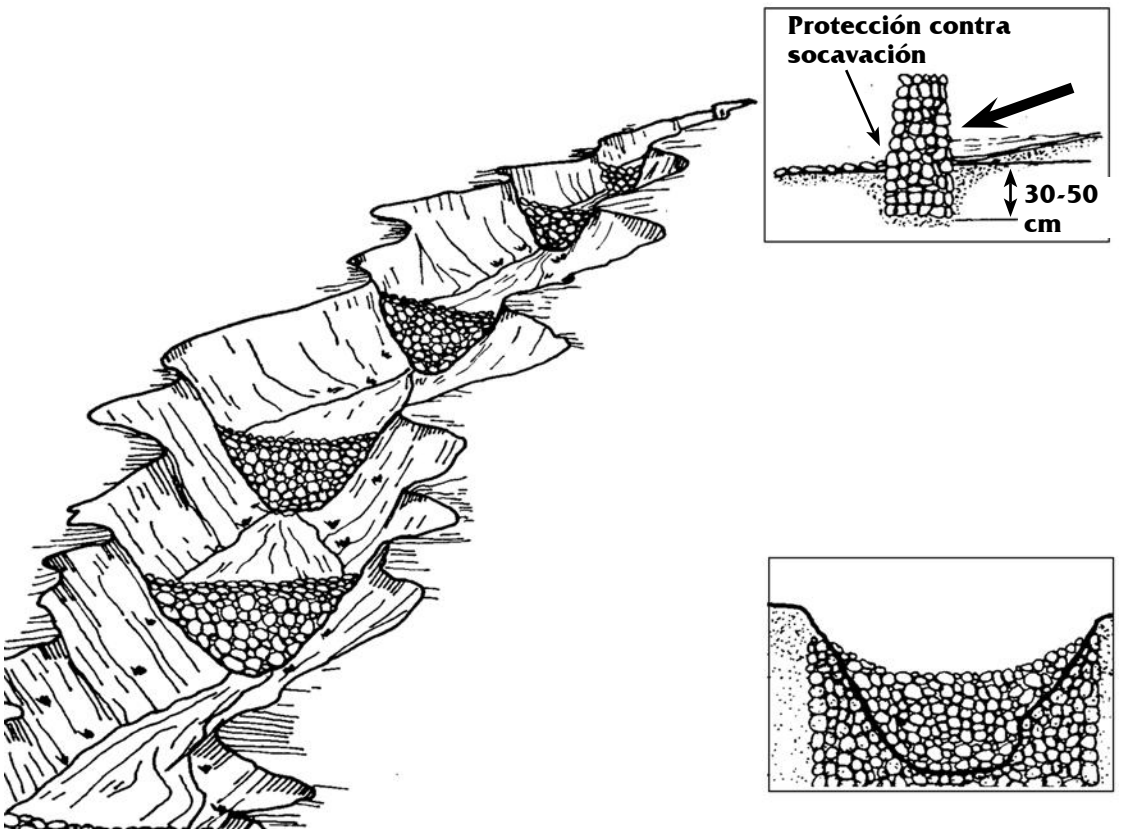
Prácticas Recomendadas

- Remover la fuente de agua.
- Controlar el flujo de agua en caso necesario mediante cunetas, bermas, taludes exteriores, etc. para alejar el agua de la parte superior de las quebradas.
- Usar diques de detención para el control de la formación de quebradas construidos con estacas, troncos, gaviones o rocas suelta, así como barreras de vegetación viva o capas de maleza plantadas en hileras a través de las laderas y de las zonas alteradas para controlar la erosión en las quebradas (véase la Figura 13.4 y la Figura 14.3).
- Instalar estructuras de control de quebradas tan pronto como sea posible después de la formación inicial de una quebrada. ¡Las quebradas por lo general aumentan de tamaño con el tiempo!
- Asegurarse de que las estructuras de control de quebradas se instalan con los detalles de diseño necesarios tales como una separación adecuada, bien anclados en las márgenes y en el fondo del canal, con una ranura en la parte superior para mantener los flujos sobre la parte media de la estructura, y protección contra la erosión en el talud descendente (Foto 14.4).
- Instalar estructuras de detención en la parte superior de la quebrada para evitar el avance hacia aguas arriba de las quebradas en zonas de praderas.

continua en página 148

Figura 14.3 Estabilización de quebradas y de zonas muy erosionadas, con diques o estructuras de detención.

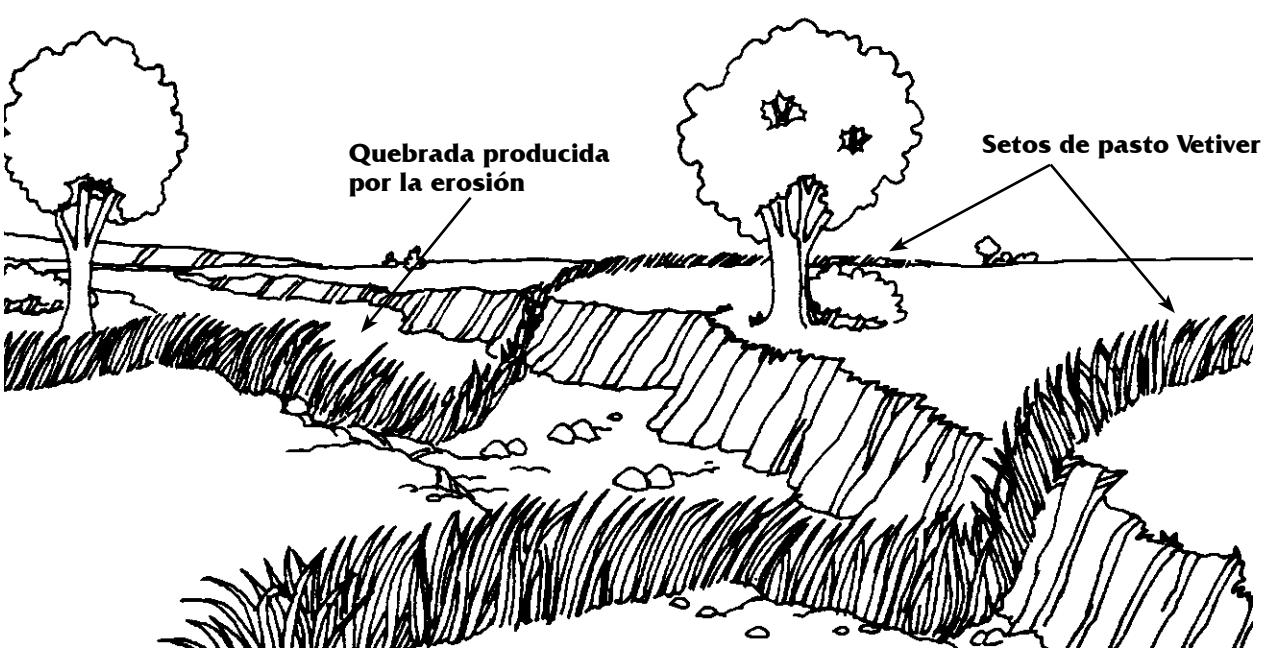
a. Estructuras de detención (diques), hechas de roca



VISTA LATERAL
La estructura debe empotrarse en el suelo nativo, en el fondo de la quebrada.

VISTA FRONTAL
Empotrar en las márgenes de suelo natural. Mantener una forma de "U" o de "V", por encima de la estructura de detención.

b. Estructuras de detención, hechas con vegetación (Adaptado de Vetiver Grass. "The Hedge Against Erosion," World Bank, 1993.)



caer en el estanque por detrás de la estructura inferior.

En lo que se refiere a la prevención de la formación de quebradas, **un "gramo" de medidas de control de la erosión puede a menudo evitar un "kilogramo" de pérdida de sedimentos** y de daños causados por la erosión. Tome las medidas necesarias para evitar la formación de quebradas y para estabilizar las quebradas existentes ¡antes de que aumenten de tamaño!

Una vez que crecen en tamaño, las medidas de estabilización de quebradas pueden resultar muy costosas.

Prácticas Recomendadas
(viene de página 146)

- Desarrollar fuentes locales de plantas y viveros para vegetación nativa que se puedan usar en las estructuras de control de quebradas.

Una estructura de control de quebradas a base de roca suelta es usada para detener su evolución hacia la parte alta de la pradera. Note que la estructura de roca está bien empotrada en las márgenes y fondo del canal.

Referencias Seleccionadas

Ordenadas por Tema:

Mejores Prácticas de Gestión - General	149
Análisis Ambiental	150
Aspectos de Planificación y Aplicaciones Especiales	151
Consideraciones Básicas de Ingeniería de Caminos Rurales	152
Hidrología para el Diseño de Cruces de Drenaje	153
Herramientas para Diseño Hidráulico y de Caminos: Fórmula de Manning, Enrocamiento, Filtros y Uso de Geosintéticos	153
Drenaje para Caminos Rurales	155
Uso, Instalación y Dimensionamiento de Alcantarillas	156
Vados o Cruces en Estiaje	156
Puentes	157
Estabilización de Taludes y Estabilidad de Cortes y Rellenos	157
Materiales para Caminos y Bancos de Materiales	158
Control de la Erosión: Métodos Físicos, Vegetal y Biotécnico	159
Estabilización de Quebradas	160

Mejores Prácticas de Gestión - General

Environmental Protection Agency. Draft 2001. National Management Measures to Control Non-point Source Pollution from Forestry. EPA Contract No. 68-C7-0014, Work Assignment #2-20. Prepared for Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency by Tetra Tech, Fairfax, Virginia. *Una guía integral de medidas para reducir la contaminación del agua, ocasionada por los caminos y las actividades forestales.*

Michigan Department of Natural Resources. 1994. Water Quality Management Practices on Forest Lands.

Minnesota Department of Natural Resources, Division of Forestry. 1994. Visual Quality Best Management Practices for Forest Management in Minnesota.

Montana State University. 1991. Montana Forestry Best Management Practices. Montana State University Extension Service. July *BMPs also produced by Montana Department of State Lands in 1992.*

Ontario Ministry of Natural Resources. 1988. Environmental Guidelines for Access Roads and Water Crossings. Queen's Printer for Ontario, Canada.

U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 2000. Water Quality Management for National Forest System Lands in California-Best Management Practices. Vallejo, CA: Pacific Southwest Region, U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 186 pp.

U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Draft 2001. Best Management Practices for Forest Roads: A performance-based framework. Washington, DC: A cooperative effort between the U.S. Department of Agriculture, Forest Service, and U.S. Environmental Protection Agency. 24 pp.

Vermont Department of Forests, Parks and Recreation. 1987. Acceptable Management Practices for Maintaining Water Quality on Logging Jobs in Vermont.

Wisconsin Department of Natural Resources. 1995. Wisconsin's Forestry Best Management Practices for Water Quality-Field Manual for Loggers, Landowners and Land Managers. Publication No. FR093. March. Madison, WI. 76 pp.

Análisis Ambiental

Bingham, Cc; Knausenberger, Wc; Fisher, W. 1999. Environmental Documentation Manual for P.L.480, Title II Cooperating Sponsors Implementing Food-aided Development Programs, February. Food Aid Management, U.S. Agency for International Development, Washington, DC.

Burpee, G.; Harrigan, P.; Remington, T. Second Edition 2000. A Cooperatoring Sponsor's Field Guide to USAID Environmental Compliance Process- Based on Regulation 216 to the USAID Environmental Documentation Manual for PL 480 Title II Food for Development Programs. Published jointly by Catholic Relief Services and Food Aid Management. Baltimore, MD. 69 pp.

Forman, R.T.; Sperling, D.; et al. 2003. Road Ecology: Science and Solutions. Washington, DC: Island Press. 482 pp. (ISBN 1-55963-933-4) *Un libro integral y reflexivo, que aborda una variedad de impactos ambientales de los caminos, sus principios y estrategias para resolver los problemas del transporte.*

Knausenberger, W.; et al. 1996. Environmental Guidelines for Small-scale activities in Africa. SD Pub. Series, Technical Paper 18, Section 3.8, Rural Roads. June. Bureau for Africa, Office of Sustainable Development, U.S. Agency for International Development, Washington, DC.

Public Law 91-190. [S. 1075]. National Environmental Policy Act of 1969. Act of January 1, 1970. [An act to establish a national policy for the environment, to provide for the establishment of a Council of Environmental Quality, and for other purposes.] In: United States statutes at large, 1969. 42 U.S.C. sec. 4231, et seq. (1970). Washington, DC: U.S. Government Printing Office; 1970: 852-856. Vol. 83.

World Bank, The. 1997. Roads and the Environment: A Handbook. Report TWU 13, and update WB Technical Paper No. 376. Washington, DC: The World Bank Environmentally Sustainable Development Vice-Presidency and Transportation, Water & Urban Development Department Transport Division. [Online] http://www.worldbank.org/transport/publicat/reh/toc.htm

Dykstra, D.; Heinrich, R. 1996. FAO Model Code of Forest Harvesting Practice. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 85 pp. (ISBN 92-5-103690-X). [Online] http://www.fao.org

Evans, W.; Johnston, B. 1972. Fish Migration and Fish Passage:A Practical Guide to Solving Fish Passage Problems. EM-7100-12. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 63 pp.

Keller, G.; Sherar, J. 2000. Practicas Mejoradas de Caminos Forestales (Manual of Best Management Practices for Forest Roads). Manual written in Spanish for US Agency for International Development (Forestry Development Project) and ESNACIFOR (Honduras National School for Forestry Sciences), Tegucigalpa, Honduras. 95 pp.

Oregon Department of Forestry. 2000. Forest Roads Manual. Forest Engineering Coordinator, State Forests Program, Oregon Dept. of Forestry, Salem, OR. (503-945-7371). *Este manual provee nociones básicas del diseño, construcción y conservación de caminos para explotación madera.*

PIARC World Roads Association. 1999. Natural Disaster Reduction for Roads, Final Report 72.02B, Paris, FR: PIARC Working Group G2. 275 pp. (ISBN 2-84060-109-5) [Online] http://www.piarc.org. *Tambien ver Comprehensive Report 72.01B, 1995.*

Rajvanshi, A.; Mathur, V.; Teleki, G.; Mukherjee, S. 2001.Roads, Sensitive Habitats and Wildlife: Environmental Guidelines for India and South Asia. Wildlife Institute of India, Dehradun, India, in collaboration with Canadian Environmental Collaborative Ltd. Toronto, Canada. [Phone # 1-416-488-3313] 215 pp. (ISBN 81-85496-10-2) *Un libro integral en aspectos de vida silvestre, hábitats y caminos, discutiendo problemas,medidas de mitigación, y ejemplos prácticos.*

U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 2000. Water/road Interaction Toolkit- FishXing: CD software and Interactive Learning for Fish Passage through Culverts. Water/Road Interaction Technology Series-SDTDC. November. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. San Dimas Technology & Development Program. [Online] http://www.stream.fs.fed.us/fishxing. *Un CD que cubre varios aspectos sobre migración de peces.*

U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 1996. Transportation and Wildlife: Reducing Wildlife Mortality and Improving Wildlife Passageways Across Transportation Corridors. Report No. FHWA-PD-96-041. Proceedings of the Florida Department of Transportation/Federal Highway Administration-Related Wildlife Mortality Seminar. Washington, DC. E*jemplos e información de la mortalidad de la vida silvestre y movimientos de animales a través de los caminos. Referirse a www.wildlifecrossings.info para información adicional y links en la materia.*

U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 1990. Fish Passage through Culverts. FHWA-FL-90-006. San Dimas, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. San Dimas Technology and Development Center. *Un buen manual en pasajes para migración de peces, con reseña literaria.*

Walbridge, T.A. 1997. The Location of Forest Roads. Virginia Polytechnical Institute and State University, Blacksburg, VA: Industrial Forestry Operations. 91 pp. *Un manual en planificación, reconocimiento, ubicación y drenaje de caminos en terreno montañoso. También disponible en español.*

American Association of State Highway and Transportation Officials. 2001. Guidelines for geometric design of very low-volume local roads (ADT<400). Washington, DC. (ISBN 1-56051-166-4). [Online] http://www.transportation.org. *Cubre los estándares del diseño geométrico de caminos con bajo volumen de tránsito o caminos locales.*

Australian Road Research Board Limited. 2000. Unsealed roads manual- Guidelines to good practice. (Revised Edition) Vermont South Victoria, Australia**:** Australian Roads Research Board, Transport Research Ltd. [Online] http://www.arrb.com.au *Un manual útil para diseño y mantenimiento de caminos de grava, particularmente en regiones semi-áridas.*

Casaday, E.; Merrill, B. 2001. Field techniques for forest and range road removal. Eureka, California: California State Parks, North Coast Redwoods District. 63 pp. *Una guía útil para el Cierre de Caminos y Eliminación, con excelentes fotos y figuras.*

Charles, R. 1997. Design of low-volume low cost roads. UWI Public Information Series/Roads, Volume 1. Dept of Civil Engineering, University or West Indes, West Indes. 132 pp. *Un manual de diseño práctico, que cubre todos los aspectos del diseño de caminos rurales, considerando especialmente climas tropicales.*

Department of Transport, South African Roads Board. 1993. Guidelines for upgrading of low volume roads. RR 92/466/2, Division of Roads and Transport, South African Roads Board, Pretoria. (ISBN 1-874844-90-9) *Un manual que provee información, consideraciones y necesidades de mejorar caminos rurales de grava.*

Geunther, K. 1999. Low maintenance roads for ranch, fire and utility access. Wildland Solutions Field Guide Series, Clyde, CA: Wildland Solutions. 48 pp. [Online] www.wildlandsolutions.com.

Keller, G.; Bauer, G..; Aldana, M. 1995. Caminos rurales con impactos minimos (minimum impact rural roads). Training Manual written in Spanish for U.S.D.A., Forest Service, International Programs, USAID, and Programa de Caminos Rurales. Guatemala City, Guatemala. 800 pp. *Se está realizando la versión en inglés.*

Moll, J.E. 1996. A guide for road closure and obliteration in the Forest Service. San Dimas Technology and Development Program. Pub. No. 7700. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 49 pp.

National Research Council, Transportation Research Board. 1978. Geometric design standards for low-volume roads. Transportation Technology Support for Developing Countries Compendium 1. Washington, DC: National Academy of Sciences. 297 pp. *Compendium que contiene diez textos seleccionados con el fin de proveer información útil para aquellos involucrados en el diseño geométrico de caminos rurales en países en desarrollo.*

Nichols, R; Irwin, L. 1993. The basics of a good road. CLRP Report No. 93-3, Ithaca, NY:Cornell University Local Roads Program, Revised by Paul Clooney as CLRP Report 96-5. 40 pp.

Ochoa, M. 2000. Technical guidelines for rural road design, construction, and improvement incorporating environmental considerations. Jicaro Galan, Honduras. Proceedings of International Environmental Workshop on Design, Construction, and Rehabilitation of Rural Roads, sponsored by CARE Honduras, USAID, and US Forest Service.

PIARC World Roads Association. 1994. International Road Maintenance Handbook-Practical guidelines for rural road maintenance. A Four Volume set published by Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire RG116AU, United Kingdom. (ISBN 0-9521860-12) *Una guía comprensiva en todos los aspectos de la conservación de caminos rurales con y sin pavimento, drenaje, estructuras, y aparatos de control de tránsito. Disponible en inglés, español, portugués y francés.*

Strombom, R. 1987. Maintenance of aggregate and earth roads. *Ver referencia en Materiales para Caminos.*

U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 1999. Road analysis: Informing decisions about managing the national forest transportation system. Misc. Report FS-643. Washington, DC: U.S. Deptartment of Agriculture, Forest Service. 222 pp. [Online] http://www.fs.fed.us/eng/road_mgt/ *Abarca costos para conservar y mitigar en relación a valores de riesgo - usos y beneficios, con respecto al daño ambiental.*

Weaver, W.; Hagans. D. 1994. Handbook for forest and ranch roads: A guide for planning, designing, constructing, reconstructing, maintaining, and closing wildland roads. Ukiah, CA: Pacific Watershed Associates for the Mendocino County Resource Conservation District, in cooperation with CDF and the NRCS. 161 pp.

Weist, R. 1998. A landowner's guide to building forest access roads. Report NA-TP-06-98. Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Area. Published in cooperation with State and Private Forestry. 45 pp.

Hidrología para el Diseño de Cruces de drenaje

American Association of State Highway and Transportation Officials. 1999, Highway Drainage Guidelines (Metric Edition). Washington, DC. (ISBN I-56051-126-5). 630 pp. [Online] http://www.transportation.org *Una guía comprensiva en todos los aspectos del diseño de drenaje para caminos.*

Jennings, M.E.; Thomas, W.O.; Riggs, H.C. 1994. Nationwide summary of U.S. Geological Survey regional regression equations for estimating magnitude and frequency of floods for ungaged sites, 1993. Water Resources Investigation Report 94-4002. Reston, VA: U.S. Geologic Survey. 38 p. Prepared in cooperation with FHWA and FEMA. [Online] http://www.ntis.gov. *Disponible a través de NTIS, Springfield, Va. Teléfono (703) 605-6000.*

Linsley, R.; Kohler, M.; Paulhus, J. 1958. Hydrology for engineers. New York, NY: McGraw-Hill Book Company, 340 p. *Un texto clásico de Hidrología.*

McCuen, R.; Johnson, P.; Ragan, R. 1996. Highway hydrology. Hydraulic Design Series No. 2. Pub. No. FHWA-SA-96-067. September. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 326 pp. [Online] http://www.fhwa.dot.gov/bridge *Abarca técnicas y métodos hidrológicos apropiados para áreas de drenaje pequeñas.*

Rosgen, D. 1996. Applied river morphology. Pagosa Springs, CO:Wildland Hydrology. (ISBN 0-9653289-0-2)

Herramientas para Diseño Hidráulico y de Caminos: Fórmula de Manning, Enrocamiento, Filtros y Uso de Geosintéticos

Barnes, H. Jr. 1967. Roughness characteristics of natural channels. U.S. Geological Survey Water Supply Pap. 1849. Washington , DC: U.S.Government Printing Office. Available through U.S. Geological Survey, Arlington, VA. 213 pp. *Presenta muchas fotos a color, comparando tipos de flujos y su Coeficiente de Rugosidad de Manning "n".*

Brown, S.; Clyde, E. 1989. Design of riprap revetment. Hydraulic Engineering Circular No. 11, March. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 156 pp. [Online] http://www.fhwa.dot.gov/bridge *Guía detallada de diseño para el dimensionamiento y ubicación de enrocamientos. Actualizado de la versión de 1978.*

Chow, V.T. 1959. Open channel hydraulics. New York, NY: McGraw-Hill Book Company. 680 pp. (ISBN 07-010776-9) *Un texto básico clásico en Hidráulica y flujo de canales.*

Copeland, R.; McComas, D.N.; Thorne,C.R.; Soar, P.J.; Jonas, M.M.; Fripp, J.B. 2001. Hydraulic Design of Stream Restoration Projects. ERDC/CHL TR-01-28, U. S. Army Engineeering Research and Development Center, U. S. Army Corps of Engineers. 175 pp. *Presenta una metodología sistemática de diseño hidráulico, para ayudar en el diseño de de proyectos de restauración de flujo.*

Holtz, R.D.; Christopher, B.R.; Berg, R.R. 1998. Geosynthetic design and construction guidelines. Participant Notebook, NHI Course No. 13213 (Revised April 1998). Rep. No. FHWA-HI-95-038. Washington DC: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 484 pp. [Online] http://www.fhwa.dot.gov/bridge *Una guía comprehensiva en el uso diseño de geotextiles, georedes y geocompositas, en aplicaciones para autopistas.*

Koerner, R. 1998. Designing with geosynthetics. 4th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. 761 pp. (ISBN 0-13-726175-6) *Esta edición actualizada cubre las últimas técnicas de diseño y materiales, usando geosintéticos.*

Racin, J.; Hoover, T.; Avila, C. 1996. California bank and shore rock slope protection design. FHWA-CA-TL-95-10 Sacramento, CA: California Department of Transportation and Federal Highway Administration, 139 pp.*Una referencia útil en el dimensionamiento y ubicación de enrocamientos.*

Schall, J.D.; Richardson, E.V. 1997. Introduction to highway hydraulics. Hydraulic Design Series No. 4. Pub. No. FHWA-HI-97-028. June. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 192 pp. http://www.fhwa.dot.gov/bridge *Cubre técnicas hidráulicas aplicadas al drenaje de la superficie de rodadura y para cruces de drenaje.*

Steward, J.; Williamson, R.; Mohney, J. 1977. Guidelines for use of fabrics in construction and maintenance of low-volume roads. Interim Rept. June. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Region 6. 174 pp. *Cubre aspectos básicos de textiles porosos tejidos y no tejidos, usadas en la construcción de caminos en el U.S. Servicio Forestal.*

U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 1994. Gradation design of sand and gravel filters. Chapter 26. In: Part 633, National Engineering Handbook. Washington, DC. 40 pp.

U.S. Department of Agriculture, Natural Resource Conservation Service. 1996. Streambank and shoreline protection. In: Engineering Field Handbook, Chapter 16. Rep. No. NEH-650-16. December. Washington, DC. 130 pp. *Abarca la protección de márgenes contra la erosión y socavación, usando vegetación, bioingeniería de suelos y sistemas estructurales.*

Blinn, C.R.; Dahlman, R.; Hislop, L.; Thompson, M. 1998. Temporary stream and wetland crossing options for forest management. Forest Service Gen. Tech. Rep. NC-202. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. 136 pp. *Cubre las opciones temporarias para el cruce de corrientes y áreas con suelos saturados, con equipo para explotación forestal y camiones madereros.*

Cedergren, H. 1977. Seepage, drainage, and flow nets. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons. 496 pp. (ISBN 0-471-14179-8)

Copstead, R.; Johansen, K.; Moll, J. 1998. Water/road interaction: Introduction to surface cross drains. Water/Road Interaction Technology Series. Res. Rep. 9877 1806 – SDTDC. September. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. San Dimas Technology & Development Program. 16 pp. [Online] http://www.fs.fed.us/eng/pubs. *Una herramienta para la interacción agua-camino está disponible también en CD.*

Elliot, W.; Graves, S.; Hall, D.; Moll, J. 1998. The X-DRAIN cross drain spacing and sediment yield model. In: Water/Road Interaction Technology Series. Res. Rep. 9877 1801 – SDTDC. June. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. San Dimas Technology & Development Program. 23 pp. [Online] http://www.stream.fs.fed.us/water-road/index.html.

Furniss, M.; Love, M.; Flanagan, S. 1997. Diversion potential at road-stream crossings. In: Water/Road Interaction Technology Series. Res. Rep. 9777 1814 – SDTDC. December. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. San Dimas Technology & Development Program. 12 pp. [Online] http://www.stream.fs.fed.us/water-road/index.html

Furniss, M.; Roelofs, T.; Yee, C. 1991. Road construction and maintenance. In:Meehan, W.R.,ed. Influences of forest and rangeland management on salmonid fishes and their habitat, Chapter 8. Special Pub. 19. Bethesda, MD: American Fisheries Society. pp. 297-324.

Orr, D. 1998. Roadway and roadside drainage. CLRP Publication No. 98-5. Ithaca, NY: Cornell Local Roads Program. 88 pp.

Packer, P.; Christensen, G. 1964. Guide for controlling sediment from secondary logging roads. [pamphlet] Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 42 pp. (Government Printing Office 1980-682-866/222)

Washington Department of Fish and Wildlife. 2002. Integrated Streambank Protection Guidelines. Aquatic Habitat Guidelines: An Integrated Approach to Marine, Freshwater, and Riparian Habitat Protection and Restoration, June. In cooperation with Washington Department of Transportation and Washington Department of Ecology. 329 pp. [Online] http://www.wdfw.wa.gov/hab/ahg/ispgdoc.htm *Describe una amplia gama de técnicas de protección de las márgenes de los cauces.*

Zeedyk, W.D. 1996. Managing roads for wet meadow ecosystem recovery. November. Tech. Rep. FHWA-FLP-96-016. Albuquerque, NM: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southwestern Region. 76 pp. *Incluye una guía de restauración de praderas inundadas.*

Uso, Instalación y Dimensionamiento de Alcantarillas

American Iron and Steel Institute. 1994, Fifth Edition. Handbook of steel drainage and highway construction products. Washington, DC: American Iron and Steel Institute. 518 pp.

Johansen, K.; Copstead, R.; Moll, J. 1997. Relief culverts. Water/Road Interaction Technology Series. Res. Rep 9777 1812-SDTDC. October. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas Technology & Development Program. 7 pp. [Online] http://www.stream.fs.fed.us/water-road/index.htm *Cubre el espaciamiento y diseño del drenaje superficial y alcantarillas de alivio de cunetas.*

Normann, J.M.; Houghtalen, R.J.; Johnston, W.J. 1985 (Reprinted 1998). Hydraulic design of highway culverts. Hydraulic Design Series No. 5. Tech. Rep. No. FHWA-IP-86-15 HDS 5. September. McLean, VA: Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Implementation. 265 pp. [Online] http://www.fhwa.dot.gov/bridge/hydpub.htm. *Incluye un diseño comprensivo para alcantarillas convencionales y alcantarillas con mejoramiento en la entrada.*

Vados o Cruces en Estiaje

Berger, L.; Greenstein, J.; Arrieta, J. 1987. Guidelines for the design of low-cost water crossings. Transportation Res. Record 1106. Washington, DC: National Researach Council, Transportation Research Board. pp. 318-327.

Clarkin, K.; Keller, G.; Warhol, T.; Hixson, S. 2006. Low-Water Crossings: Geomorphic, Biological and Engineering Design Considerations. SDTDC 0625 1808P, San Dimas Technology and Development Center, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas, CA. 366 p. [Online] http://www.fs.fed.us/eng/pubs. *Una publicación completa y útil con información específica para diseño de vados, paso de pez y función de canales naturales en relación a vados.*

Coghlan, G.; Davis, N. 1979. Low-water crossings. Transportation Res. Record 702, Washington, DC: National Research Council, Transportation Research Board. pp. 98-103.

Eriksson, M. 1983. Cost-effective low-volume-road stream crossings. Transportation Res. Record 898. Washington, DC: National Research Council, Transportation Research Board. pp. 227-232.

Lohnes, R.A.; Gu, R.R.; McDonald, T.; Jha, M.K. 2001. Low-Water Stream Crossings: Design and Construction Recommendations. Final Report CTRE Project 01-78, IOWA DOT Project TR-453, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University. 50 pp. [Online] www.ctre.iastate.edu *Una publicación útil con información específica para diseño de vados.*

Moll, J. 1997. Site and selection of low water crossings. In: Ecosystem Road Management. Compiled by San Dimas Technology and Development Center. San Dimas, CA:U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

Motayed, A.K.; Chang, F.M.; Mukherjee, D.K. 1982. Design and construction of low-water stream crossings. Report No. FHWA/RD-82/163. June. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 119 pp. *Una reseña completa en criterios para diseño de estructuras para cruces en estiaje, selección del lugar y tipos de estructuras. Esta publicación esta siendo actualmente revisada y actualizada por Robert Gu, de la Iowa State University.*

Ring, S.L. 1987. The design of low-water stream crossings. Transportation Res. Record 1106. Washington, DC: National Research Council, Transportation Research Board. pp. 309-318.

U.S. Department of Transportation, Transportation Research Board. 1979. Low-cost water crossings. Compendium 4, Transportation Technology Support for Developing Countries. Prepared for U.S. Agency for International Development. Washington, DC. 203 pp. *Provee información útil para aquellos países en desarrollo que tienen responsabilidad directa de cruces en estiaje económicos.*

Wahrhol, T.; Pyles, M. 1989. Low water fords: An alternative to culverts on forest roads. August 27-30; Coeur d'Alene, ID: Proc. 12th Annual Council on Forest Engineering Meeting.

Puentes

American Association of State Highway and Transportation Officals, Inc. 2002. Standard specifications for highway bridges, 17th Edition. Washington, DC. [Online] http://www.aashto.org and http://www.transportation.org *Cubre todos los aspectos de diseño para puentes de madera, acero y concreto, subestructuras, cimentación, muros de retención, así como también placas estructurales y alcantarillas.*

Groenier, S.; Gubernick, R. 2007. Choosing the Best Site for a Bridge, Transportation Research Record No.1989, Transportation Research Board of the National Academies, pp 347-354.

Nagy, M.; Trebett, J.; Wellburn, G. 1980. Log bridge construction handbook. FERIC Handbook #3, Vancouver, B.C., Canada: Forest Engineering Research Institute of Canada. (ISSN 0701-8355) 421 pp.

Neill, C. 1973. Guide to bridge hydraulics (plus Metric Revision Supplement). Toronto, ON: Project Committee on Bridge Hydraulics, Roads and Transportation Association of Canada, University of Toronto Press. 191 pp. (ISBN 0-8020-1961-7)

Richardson, E.V.; Davis, S.R. 2001. Evaluating scour at bridges, Fourth Edition. Hydraulic Engineering Circular No. 18. Pub. No. FHWA-NHI-01-001. May. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 378 pp. [Online] http://www.fhwa.dot.gov/bridge *Cubre todos los aspectos de la evaluación de la socavación y determinación de la profundidad de socavación.*

Estabilización de Taludes y Estabilidad de Cortes y Rellenos

Barrett, R.K. 1985. Geotextiles in earth reinforcement. Geotechnical Fabrics Report, March/April:15-19.

Elias, V.; Christopher, B.R. 1997. Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes - design and construction guidelines. August. Tech. Rep. No. FHWA-SA 96-071, reprinted September 1998. FHWA Demonstration Project 82.Washington, DC: Department of Transport., Federal Highway Administration. 396 pp. [Online] http://www.fhwa.dot.gov/bridge *Cubre el diseño de muros de suelos mecánicamente estabilizados y taludes de suelos reforzados.*

Gray, D.; Leiser, A. 1982. Biotechnical slope protection and erosion control. Melbourne, FL: Krieger Publishing Co. 288 pp. (ISBN 0-442-21222-4) *Cubre varias técnicas de estabilización biotécnica de taludes y control de erosión.*

Hoek, E.; Bray, J. 1974. Rock slope engineering. London: Institute of Mining and Metallurgy. 358 pp. (ISBN 0-900488-573)

Keller, G.; Cummins, O. 1990. Tire retaining structures. Engineering Field Notes. 22:15-24, March/April. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

Mohney, J. 1994. Retaining wall design guide. 2d ed. Tech. Rep. No. EM-7170-14. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Engineering Staff. Also Pub. No. FHWA-FLP-94-006. September. Washington, DC: Department of Transportation, Federal Highway Administration, Federal Lands Highway Program. 537 pp. [Online] http://www.ntis.gov/ *Cubre el análisis y diseño de una amplia variedad de estructuras de retención de bajo costo.*

Turner, A.K.; Schuster, R.L. 1996. Landslides — investigation and mitigation. Tech. Rep. No. TRB-SR-247. Washington, DC: National Research Council, Transportation Research Board. National Academy Press. 680 pp. (ISBN 0-309-06208-X) *Una publicación integral de todos los aspectos del riesgo de deslizamiento, investigación, su análisis, el diseño de medidas de estabilización de taludes de suelos inestables y de roca, además de aplicaciones especiales.*

U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 1994. Slope stability reference guide for National Forests in the United States. EM-7170-13. Engineering Staff, Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Available from the Government Printing Office, Phone (202) 512-1800, http://bookstore.gpo.gov/ *Un compendio de tres volumenes con información de todos los aspectos de la estabilización de taludes, identificación, planificación y riesgo, métodos de análisis y técnicas de estabilización, escrito por técnicos de campo. Una guía práctica para geólogos e ingenieros que tienen que ver con problemas de estabilidad de taludes.*

Materiales para Caminos y Bancos de Materiales

Australian Roads Research Board. 1996. Road dust control techniques – Evaluation of chemical dust suppressants' performance. Spec. Rep. 54. Victoria, Australia**:** Australian Roads Research Board, Transport Research Ltd. [Online] http://www.arrb.com.au. *Cubre los productos disponibles, como funcionan, como seleccionar el producto y los impactos ambientales del mismo.*

Bolander, P.; Yamada, A. 1999. Dust palliative selection and application guide. Technology & Development Program No. 9977 1207—SDTDC. November. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. San Dimas Technology and Development Program. 19 pp.

Dunne, T.; Collins, B. 1990. Fluvial geomorphology and river gravel mining: A guide for planners, case studies included. Special Publication SP 098**.** Sacramento, CA: California Department of Conservation, Division of Mines and Geology. 29 pp.

Rodriguez, A.; del Castillo, H.; Sowers, G. F. 1988. Soil mechanics in highway engineering. Federal Republic of Germany: TransTech Publications. 843 pp. (ISBN 0-87849-072-8)

Scholen, D.E. 1992. Non-standard stabilizers. Pub. No. FHWA FLD-92-011. July. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Direct Federal Programs. *Cubre el uso de varios productos no tradicionales para la estabilziación de la superficie de rodadura, utilizados por el U.S. Servicio Forestal.*

South Dakota Local Transportation Assistance Program. 2000. Gravel roads: maintenance and design manual. November. Published in cooperation with U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 63 pp. [Online] http://www.epa.gov/owow/nps/gravelroads/ *Un manual útil en el diseño y conservación de caminos de grava, con excelentes fotos y figuras.*

Sowers, G. F. 1979. Introductory soil mechanics and foundations: Geotechnical Engineering. 4th ed. New York: Macmillan. 621 pp. (ISBN 0-02-413870-3) *Un libro de texto básico en Mecánica de Suelos.*

Strombom, R. 1987. Maintenance of aggregate and earth roads. WA-RD 144.1. June. Olympia, WA: Washington State Dept. of Transportation. Reprinted as Federal Highway Administration Publication No. FHWA-TS-90-035. 71 pp. *Un manual del Estado del Arte en el mantenimiento y administración de caminos de agregados y de suelos nativos.*

U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 1996. Earth and aggregate surfacing design guide for low-volume roads. Pub. No. EM-7170-16. September. Washington, D.C. 302 pp. *Cubre la metodología de diseño para el Programa de Espesor de la Superficie, así como también es una ayuda para seleccionar el tipo de material para la superficie de rodadura y su conservación.*

U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 1998. Problems associated with gravel roads. Publication No. FHWA-SA-98-045. May. Washington, DC: Produced through Local Technical Assistance Program.

Yamada, A. 1999. Asphalt seal coat treatments. Technology & Development Program No. 9977 1201—SDTDC. April. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas Technology & Development Program. 24 pp.

Yoder, E.J.; Witczak, M.M. 1975. Principles of pavement design. 2d ed. New York: John Wiley & Sons. 711pp. (ISBN 0-471-97780-2) *Un texto clásico en los fundamentos del diseño de pavimentos.*

Control de la Erosión: Métodos Físico, Vegetal y Biotécnico

Association of Bay Area Governments. 1995. Manual of standards for erosion & sediment control measures, 2d ed.. May. San Fransisco, CA. 500 pp. *Una guía de campo completa para el control de la erosión del suelo en California.*

Burroughs, E.; King, J. 1989. Reduction of soil erosion on forest roads. Tech. Rep. No. FSGTR-INT-264, July. Moscow, ID: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 26 pp. *Cubre la reducción esperada en la erosión de la superficie con tratamientos seleccionados, aplicados en la superficie de rodadura, cunetas, taludes de corte y de relleno, de caminos forestales.*

Clackamas County Water Environment Services. 2000. Erosion prevention and sediment control: planning and design manual. Oregon: Developed in cooperation with City of West Lynn and the Unified Sewerage Agency of Washington County. Ph 503-353-4567. *Presenta varias de las Mejores Prácticas de Gestión para el control de la erosión y de sedimentos, con buenas fotos e ilustraciones.*

Gray, D.; Leiser, A. 1982. Biotechnical slope protection and erosion control. Melbourne, FL: Krieger Publishing Co. 288 pp. (ISBN 0-442-21222-4) *Un buen libro de texto que abarca varias técnicas de control biotécnio de la erosión, su diseño y construcción.*

Gray, D.; Sotir, R. 1996. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization-A practical guide for erosion control. New York, NY: A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, Inc. 378 pp. (ISBN 0-471-04978-6) *Cubre varias técnicas biotécnicas para el control de la erosión y su aplicación.*

Grimshaw, R.G.; Helfer, L. (eds.). 1995. Vetiver grass for soil and water conservation, land rehabilitation, and embankment stabilization: a collection of papers and newsletters compiled by the vetiver network. World Bank Technical Pap. No. 273. Washington, DC: The World Bank. 288 pp. *Una colección de trabajos y artículos apoyando el uso de pasto Vetiver como un sistema biológico de bajo costo, para el control de la erosión y la conservación del agua.*

Lewis, L. 2000. Soil Bioengineering -- An Alternative for Roadside Management, A Practical Guide. Technology & Development Program No. 0077-1801-SDTDC, September. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas Technology & Development Center, San Dimas, CA. 43 pp.

Morfin, S.; Elliot, W.; Foltz, R.; Miller, S. 1996. Predicting effects of climate, soil, and topography on road erosion with the WEPP model. In: Proceedings of the 1996 American Society of Agricultural Engineers, Annual International Meeting; 1996 July 16; Phoenix, AZ. ASAE Paper No. 965016. St. Joseph, MI: ASAE. 11 pp. *Uso del modelo de erosión de suelos: Water Erosion Prediction Project (WEPP).*

U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1978**.** Estimating sheet-rill erosion and sediment yield on rural and forest highways. WTSCTN Woodland 12. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 33 pp. *Información básica en el uso de la Universal Soil Loss Equation (USLE) para predecir la pérdida de erosión en caminos.*

U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1992**.** Soil bioengineering for upland slope protection and erosion reduction. In: Engineering Field Handbook, Chapter 18. October. Rep. No. EFH-650-18.Washington, DC. 62 pp. *Cubre técnicas biotécnicas para el control de la erosión y su uso, con excelentes fotos y dibujos.*

World Bank, The. 1993. Vetiver grass: The hedge against erosion. Washington, DC. 78 pp. (ISBN 0-8213-1405) [Online] http://www.vetiver.org/ *Un panfleto básico y útil de las aplicaciones del pasto Vetiver. La versión en español fue publicada en 1990.*

Estabilización de Quebradas

Gray, D.; Leiser, A. 1982. Biotechnical slope protection and erosion control. Melbourne, FL: Krieger Publishing Co. 288 pp. (ISBN 0-442-21222-4) *Cubre varias técnicas para el control de la erosión y medidas para la estabilización de quebradas.*

Heede, B. 1976. Gully development and control: The status of our knowledge. Research Paper RM-169. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 42 pp. *Una guía básica de la formación de quebradas, técnicas de estabilización y tipos de estructuras de control.*