

Estándares para la protección y
evaluación de impacto ambiental en
humedales urbanos para obras de
infraestructura pública del MOP

VOLUMEN III. Estrategias de diseño ecosistémico

Capítulo 8

El **Centro de Humedales Río Cruces (CEHUM)** es un centro integral de conservación de humedales de la Universidad Austral de Chile. Posee un modelo de gobernanza mixto con presencia de la sociedad civil, instituciones públicas y la academia. Se origina como una de las medidas de reparación dictaminadas por el Primer Juzgado Civil de Valdivia, con fecha 27 de julio de 2013 en el fallo por daño ambiental ocasionado por Arauco S.A. sobre el humedal del Río Cruces (medida reparatoria N °4).

Su misión, visión y objetivos estratégicos nacen de los acuerdos tomados en el Consejo Científico Social, que precisó las orientaciones para el cumplimiento de las medidas de restauración del Humedal Río Cruces y sus tributarios, establecidos en el fallo del Primer Juzgado Civil de Valdivia. Posee 4 ejes de trabajo (Investigación, Educación Ambiental, Gestión para la Conservación, Gobernanza). A esto se suma la habilitación de infraestructura de uso público en la ciudad de Valdivia, en torno a la casona Roberto Schlatter Vollmann en el sector Cabo Blanco, lo que incluye un centro de educación e interpretación ambiental y un área de investigación y conservación de humedales.

El CEHUM busca ser una institución de referencia capaz de contribuir significativamente a la restauración y conservación de los humedales, aportando a su conocimiento, gestión y educación ambiental. Se perfila como un centro de referencia mundial, capaz de contribuir a la prevención de presiones antrópicas y de anticiparse a los efectos de amenazas naturales, que afecten la sustentabilidad del Humedal del Río Cruces (HRC) y de otros humedales.



Dirección de proyecto

IGNACIO RODRÍGUEZ JORQUERA | Responsable del proyecto y asesor científico.
PhD Estudios Interdisciplinarios, University of Florida / MSc Recursos Hídricos, UACH |
Médico Veterinario, Universidad de Chile.

FLAVIO SCIARAFFIA MÁRQUEZ | Project manager y coordinador técnico. Magister
en Arquitectura del Paisaje, Harvard University Graduate School of Design | Magister en
Proyecto Urbano, PUC | Arquitecto, PUC.

Equipo técnico

**CAMILA BAÑALES SEGUEL | Coordinadora metodológica y especialista senior en
evaluación de impacto ambiental, sustentabilidad y conservación de humedales.**
PhD en Ciencias Ambientales con Mención en Sistemas Acuáticos Continentales,
Universidad de Concepción | Ingeniera Agrónoma, PUC.

**TERESITA SCHEUCH PEREIRA | Coordinadora metodológica y especialista senior
en hidrología y ecohidrología de humedales.** Magister en Ciencias de la Ingeniería,
PUC | Ingeniera Civil Hidráulica, PUC.

**FRANCISCA URRUTIA VALENZUELA | Analista ambiental de obras de
infraestructura.** Magíster en Manejo de Recursos Naturales, Universidad de la Frontera
| Ingeniera Civil Ambiental, UFRO

**BASTIÁN OÑATE POTTHOFF | Analista en conservación y ecología de
ecosistemas acuáticos.** Ingeniero en Conservación de Recursos Naturales y Magister
en Ciencias, Mención Recursos Hídricos (en curso), Universidad Austral de Chile.

Diseño de portada y figuras

Tomás Valdivieso Sierpe | Indaga.me

Julieta Torres Etcheberry | Indaga.me

Cómo citar este informe

Rodríguez-Jorquera, Ignacio., Sciaraffia, Flavio., Bañales, Camila., Scheuch, Teresita.,
Urrutia, Francisca., Oñate, Bastián., 2024. “Estándares para la protección y evaluación
de impacto ambiental en humedales urbanos para obras de infraestructura pública del
MOP. Volumen III. Estrategias de diseño ecosistémico”. Centro de Humedales del Río
Cruces y Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.

Contexto del estudio

En enero de 2020 se publicó la Ley 21.202 de Protección de Humedales Urbanos del Ministerio del Medio Ambiente (MMA). Dicha Ley establece que los humedales urbanos¹ son ecosistemas susceptibles de ser protegidos a través de un proceso de declaración de iniciativa municipal o de oficio. Asimismo, modifica el art. 10 de la Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente indicando que los proyectos o actividades que puedan causar impacto ambiental en humedales urbanos, de la forma en que la norma lo describe, deberán someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)². De igual modo, establece que, una vez declarado el humedal urbano, las municipalidades deberán incluirlo como área de valor natural en los Instrumentos de Planificación Territorial correspondientes.

Por su parte el Reglamento de la Ley precitada, aprobado mediante el DS 15, de 2020 del MMA entró en vigor en noviembre de 2020, y estableció los Criterios Mínimos de Sustentabilidad, Gestión Sustentable y Gobernanzas de los humedales.

En dicho contexto, al Centro de Humedales de la Universidad Austral de Chile (CEHUM), como entidad con amplias competencias en la materia, le correspondió un rol activo en la elaboración del reglamento mediante una propuesta de criterios mínimos, que fue validada socialmente por múltiples actores a lo largo del país. Además, elaboró la Guía de Implementación Municipal con una serie de medidas orientadas al cumplimiento de los criterios mínimos. Luego de más de dos años de la entrada en vigor de la Ley, se puede constatar que más de 90 humedales urbanos han sido declarados en Chile, proceso que no ha estado exento de reclamaciones.

Dada la experiencia antes referida, el CEHUM se ha convertido en un referente a nivel nacional respecto a la restauración y conservación de los ecosistemas de humedales.

Por otro lado, el Ministerio de Obras Públicas tiene por misión recuperar, fortalecer y avanzar en la provisión y gestión de obras y servicios de infraestructura para la conectividad, la protección del territorio y las personas, la edificación pública y el aprovechamiento óptimo de los recursos hídricos; asegurando la provisión y cuidado de los recursos hídricos y del medio ambiente, para contribuir en el desarrollo económico, social y cultural, promoviendo la equidad, calidad de vida e igualdad de oportunidades de las personas.

En el marco de tal misión, este Ministerio a través de la Dirección de Obras Hidráulicas desarrolla estudio, proyección, construcción y conservación de las obras de defensa de terrenos y poblaciones contra crecidas de corrientes de agua y regularización de las riberas y cauces de los ríos, lagunas y esteros.

¹ De acuerdo con la ley 21.202, corresponden a aquellos humedales que se encuentran total o parcialmente dentro de un límite urbano.

² Cabe mencionar que la Contraloría General de la República en su dictamen N°E129413 estableció que los proyectos y actividades que afecten a humedales en los términos que establece el literal s) del art. 10 de la ley 19.300 deben someterse al SEIA, aun cuando no haya una declaración de humedal urbano vigente o en trámite. De este modo, para estos efectos, debe entenderse que es objeto de protección cualquier humedal, sus componentes y las interacciones entre estos, así como los flujos ecosistémicos de aquellos que se hallen total o parcialmente dentro del límite urbano, independiente de la declaratoria de “humedal urbano” a cargo del Ministerio del Medio Ambiente.

Por otra parte, a través de la Dirección de Vialidad, provee obras y servicios de infraestructura vial a la ciudadanía, entre las cuales se encuentran los puentes, que se definen como obras destinadas a permitir la continuidad de un camino de uso público sobre obstáculos naturales, tales como ríos, mar, esteros y lagos.

Ambas áreas de competencias, de gran relevancia para la ciudadanía y para el desarrollo de la función pública de este Ministerio, se han visto impactadas por la Ley 21.202, pues se desarrollan en o cercanas a humedales, por lo cual, requieren adoptar medidas que les permitan seguir desarrollándose en armonía con las normas de protección a estos ecosistemas.

Es en este contexto de avances en materia de protección de humedales y, teniendo presente la experiencia del CEHUM, que el Ministerio de Obras Públicas requiere contratar un Estudio a dicho centro, con el propósito de orientar la compatibilización de la ejecución de obras de conservación vial y fluvial con la protección de humedales y sus componentes bióticos y abióticos. Además, de un análisis de dos obras piloto (obra de conservación y una obra en condiciones de ingreso al SEIA) determinando las componentes ambientales que correspondan para identificar correctamente los impactos y sus medidas³.

³ El alcance del estudio no considera la Evaluación ambiental en el SEIA (EIA).

Objetivos generales

Objetivo A

- Identificar y proponer recomendaciones para compatibilizar la ejecución de obras de conservaciones viales y fluviales que se desarrollen en o cercanos a humedales, disminuyendo la eventual afectación a estas áreas, utilizando como referencia las componentes ambientales de las guías de evaluación SEIA. Además, los resultados se aplicarán en una obra piloto de conservación identificando las medidas para minimizar el impacto ambiental.

Objetivo B

- Identificar impactos y proponer medidas en la evaluación de impacto ambiental de dos tipologías de obras de infraestructura MOP (puentes y caminos) que afecten a humedales y que ingresen al SEIA. Además, los resultados se aplicarán en una obra piloto para la identificación y caracterización de impacto y las medidas de compensación, reparación y/o mitigación adecuadas.

Objetivo C

- Realizar un programa de capacitación sobre humedales urbanos, incluyendo aspectos ecológicos y normativos.

Objetivos específicos

Objetivo A

- i. Determinar medidas para evitar y/o disminuir los impactos humedales de un conjunto de obras de conservación viales y fluviales definidas por el MOP en el Anexo I de los TdR.
- ii. Evaluar y analizar las medidas determinadas en el literal i, en una obra piloto de conservación de cauce.

Objetivo B

- i. Proponer los umbrales a cada uno de los criterios establecidos en el literal s) del Artículo 10, que definen el ingreso al SEIA, determinando el instrumento (DIA o EIA).
- ii. Realizar una interpretación práctica para dos obras MOP (puentes y caminos), de la guía de evaluación del SEA (preliminar) para humedales urbanos, identificando los estudios necesarios para evaluar los impactos en las componentes ambientales y definir medidas generales de compensación, reparación y/o mitigación.
- iii. Identificar y caracterizar en una obra piloto (puente en condiciones de ingreso al SEIA), los estudios necesarios para realizar la evaluación del impacto ambiental, en todos los criterios del literal s) y las medidas de compensación, reparación y/o mitigación según correspondan.
- iv. Realizar un catastro de principios y criterios para el diseño ecosistémico que minimicen el impacto ambiental en humedales urbanos en el desarrollo de obras de infraestructura de cruces (puentes y/o carreteras) sobre humedales, lo anterior basado en análisis bibliográfico, especialmente de experiencias internacionales.

Objetivo C

- i. Capacitar a funcionarios MOP en materias de humedales urbanos a través de un programa de 3 módulos en formato “on-line” y realización de talleres presenciales.

Índice de contenidos

RESUMEN EJECUTIVO Informe Volumen III	14
CAPÍTULO 8 Catastro de principios y criterios de diseño ecosistémico	17
8.1 Introducción	18
8.2. Lineamientos generales para el diseño de atravesos sobre humedales con funcionalidad ecológica	21
8.3 Lineamientos generales para el manejo del lecho de cauces.....	40
8.4 Lineamientos generales para el diseño de pasos de fauna	65
8.5 Matriz de resumen.....	78

Índice de figuras

Figuras Capítulo 8

Figura C8. 1. Anchos de cauce representativos de una sección transversal tipo. Fuente: Elaboración propia.....	21
Figura C8. 2. Ancho del cauce activo (Canal de flujos bajos y crecidas ordinarias) y ancho del cauce lleno en un estero pequeño. Fuente: https://www.fws.gov/alaska-culvert-design-guidelines	22
Figura C8. 3. Geometría planar de cauces. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura C8. 4. Rangos de conectividad hidrológica y ecológica de diferentes atravesos. Fuente: Elaboración propia en base a https://www.fws.gov/alaska-culvert-design-guidelines	23
Figura C8. 5. Emplazamiento de un atraveso que respeta el ancho de cauce lleno y sección transversal del cauce. Fuente: Elaboración propia en base a https://www.fws.gov/alaska-culvert-design-guidelines	24
Figura C8. 6. Alcantarilla perchada o elevada. Fuente: Massachusetts Stream Crossing Handbook (Division of Ecological Restoration, 2012).	25
Figura C8. 7. Alcantarilla con agua poco profunda. Fuente: Massachusetts Stream Crossing Handbook (Division of Ecological Restoration, 2012).....	25
Figura C8. 8. Socavación en la zona aguas abajo de un travieso tipo cajón de hormigón. Fuente: Massachusetts Stream Crossing Handbook (Division of Ecological Restoration, 2012).	26
Figura C8. 9. Obstrucción de atraveso tipo alcantarilla por material leñoso. Fuente: https://ilmenvironments.com/	26
Figura C8. 10. Esquema de un arco abierto. Fuente: Elaboración propia en base a The Wetland BMP Manual: Techniques for Avoidance and Minimization (Rhode Island Department of Environmental Management Freshwater Wetlands Program, 2010).....	28
Figura C8. 11. Referentes de arcos abiertos de diferentes materialidades. Fuente: Según se indica en cada imagen.	30
Figura C8. 12. Tuberías con sección transversal tipo arco. Al ser cerradas estas deben ser enterradas para conservar el lecho natural del cauce. Fuente: Según se indica en cada imagen.	30
Figura C8. 13. Esquema de un cajón abierto. Fuente: Elaboración propia en base a The Wetland BMP Manual: Techniques for Avoidance and Minimization (Rhode Island Department of Environmental Management Freshwater Wetlands Program, 2010).....	31
Figura C8. 14. Referentes de atravesos tipo arcos abiertos. Fuente: Según se indica en cada imagen.	32
Figura C8. 15. Elementos prefabricados para la construcción de un atraveso tipo arco abierto. Fuente: Según se indica en cada imagen.	33
Figura C8. 16. Esquema de cajón modificado para paso de fauna. Fuente: Elaboración propia en base a The Wetland BMP Manual: Techniques for Avoidance and Minimization (Rhode Island Department of Environmental Management Freshwater Wetlands Program, 2010)	34
Figura C8. 17. Esquema de cajón modificado para paso de fauna con rampas de acceso y cierre perimetral. Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).	35
Figura C8. 18. Alternativas para modificar cajones para el paso de fauna. Fuente: Elaboración propia en base a Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).....	35
Figura C8. 19. Referentes de cajones modificados para el paso de fauna. Fuente: Según se indica en cada imagen.	37
Figura C8. 20. Esquema en planta y de la sección transversal de un atraveso con alcantarillas en la planicie de inundación. Fuente: https://www.fws.gov/alaska-culvert-design-guidelines	38

Figura C8. 21. Referentes de atraviesos con alcantarillas en la planicie de inundación. Fuente: Según se indica en cada imagen.....	39
Figura C8. 22. Esquema de los organismos que dependen de la zona hiporréica, o la transición entre el cauce, el lecho del cauce y la napa subterránea de agua. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura C8. 23. El cambio en la sinuosidad aumenta la velocidad del flujo por el cauce y esto aumenta la erosión hacia aguas abajo. Fuente: Lazarus & Constantine, 2013.	42
Figura C8. 24. Compactación del lecho, remoción de piedras y bolones, emparejamiento de orillas. Fuente: https://www.ecrr.org/River-Restoration/Why-restore-rivers	42
Figura C8. 25. Riberas desprotegidas debido a una estabilización inadecuada. Fuente:	43
Figura C8. 26. Proyecto “Boulder Creek, Antelope, Feather River. En este curso de agua se removieron todos los troncos de gran tamaño y ramas. La medida posterior tuvo como objetivo el devolver la conectividad hidrológica que sea había perdido proyecto de la extracción de material leñoso. Fuente: https://plumascorp.org	43
Figura C8. 27. Escorrentía de aguas lluvias pone en evidencia la inadecuada estabilización de esta ribera. Fuente: https://riverlink.org/urbanization-and-stormwater-runoff/	44
Figura C8. 28. Se observa la socavación de la orilla del cauce por debajo del pie de la canasta de gaviones. Fuente: Harring et al. 2023. Sustainable Bank and Channel Stabilization Techniques in Arid Southwest Streams. Wetlands Regulatory Assistance Program.....	44
Figura C8. 29. Ejemplos de barreras transversales que interrumpen la conectividad longitudinal (a lo largo del cauce). Se sugiere evitar en la etapa de diseño del proyecto. A la izquierda una barrera generada por una represa y a la derecha la barrera la constituye la alcantarilla desconectada del lecho fluvial. Fuente: Derecha – https://www.nature.org/ ; Izquierda - https://hewlett.org/openriversfund/ ..	45
Figura C8. 30. Ejemplos de cauces con diferentes sinuosidades. Este atributo geomorfológico ayuda a disipar la energía del flujo y a reducir la velocidad, minimizando la erosión. Fuente: Elaboración propia en base a Ghosh, Kausik. (2014). Planform Pattern of the Lower Teesta River After the Gazaldoba Barrage, Indian Journal of Geography and Environment.....	47
Figura C8. 31. Primera implementación (2006) de técnica de “plug and pond” (“taco y estanque”) en California, Feather River Watershed - Red Clover / McReynolds Creek Project. Fuente: Plumas Corporation. https://plumascorp.org/	48
Figura C8. 32. Mejoramiento de la sinuosidad del cauce. Fuente: Manual of River Restoration Techniques.....	49
Figura C8. 33. Ejemplo de diseños de infraestructura verde que permitan mejorar la sinuosidad del cauce al mismo tiempo que se compatibiliza con el uso público de un parque urbano inundable. Fuente: Patagua, Fundación Legado Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile. (2021). Ciudades sensibles al agua. Guía	50
Figura C8. 34. Perfil de vista de planta en un río con mejoramiento del lecho del cauce mediante la incorporación de una secuencia de pozas y rápidos (pools and rifles). Fuente: Manual of River Restoration Techniques.	52
Figura C8. 35. Perfil de vista lateral del río. Se observa la formación de una secuencia de pozas y rápidos (“pools and rifles”) con diferentes tamaños de rocas, bolones y grava. Fuente: Manual of River Restoration Techniques.	52
Figura C8. 36. Proyecto “Integrated Green Horn Creek” cuyo objetivo fue detener la erosión del lecho y las orillas en dos sitios diferentes (arriba y abajo). (a) En el sitio 1, la situación inicial presenta una orilla severamente socavada con la desconexión total de la planicie. (b) La situación posterior considera un re perfilado de la orilla y aplicación de revestimientos vegetales. (c) En el sitio 2, el lecho presentaba un desnivel de 1.5 desde una plataforma de una represa. (d) El diseño utilizó rocas y	

bolones para incrementar la rugosidad, además de estructuras escalonadas tanto en el cauce como en las orillas y la planicie. Fuente: https://plumascorp.org/	53
Figura C8. 37. En este sitio se ocuparon rocas de gran tamaño y bolones para un gradiente que atenuara la velocidad del agua Fuente: Bank Protection / Erosion Repair Design Guide. Chapter 1. Water Resources Infrastructure Protection Manual.....	54
Figura C8. 38. Esquema de tipos de colapso de orillas más comunes. La línea punteada representa el perfil original. Las flechas indican la dirección del movimiento. Fuente: Elaboración propia en base a Roca & Simm. 2017. Green Approaches in River Engineering.....	55
Figura C8. 39. Comparación de perfiles típicos para orillas empinadas (>5m) y orillas bajas (< 2m) con gradiente de vegetación funcional entre orillas y cauces. Fuente: Elaboración propia en Bariteau, et al. 2013. “A Riverbank Erosion Control Method with Environmental Value.”.....	57
Figura C8. 40. Uso de vegetación hidrófila para revestimiento del cauce y las orillas. Fuente: Frisch & Severi. “Manual of River Restoration Techniques.”.....	60
Figura C8. 41. Combinación de colchones de fibra de coco, estacas y paquetes de rastrojo. Fuente: Frisch & Severi. “Manual of River Restoration Techniques.”.....	60
Figura C8. 42. Combinación de rollos de fibra de coco con vegetación, sujetos por estacas de madera: Fuente: https://terraqua.co.uk/lakes-and-ponds/erosion-control/	61
Figura C8. 43. Aplicación de paquetes de rastrojo afirmados con estacas de madera. Fuente: https://www.wildtrout.org/content/upper-itchen	61
Figura C8. 44. Enrocado conservando árboles principales, sin agregar vegetación adicional. Fuente: https://www.fema.gov/pdf/about/regions/regionx/Engineering_With_Nature_Web.pdf	61
Figura C8. 45. Esquema de uso de troncos con raíz para la estabilización de riberas. Fuente: Elaboración propia en base a Manual of Restoration Techniques. Riveting and supporting river banks.....	63
Figura C8. 46. Fotografía de orilla antes y después de la aplicación de tocones con raíz. Izquierda: inmediatamente luego de la instalación (marzo 2004). Derecha: Crecimiento de los tocones dos años después de la instalación (2006). Fuente: Manual of River Restoration Techniques.....	64
Figura C8. 47. Introducción de troncos, ramas y raíces al interior del lecho del río. Fuente: FEMA, https://www.fema.gov/pdf/about/regions/regionx/Engineering_With_Nature_Web.pdf	64
Figura C8. 48. Dos ejemplares de huillín atropellados en infraestructura vial en diferentes sectores de Chiloé, en julio de 2024 (izquierda) y octubre de 2024 (derecha). Fuente: www.soychiloe.cl	65
Figura C8. 49. Ejemplo de pasos de fauna bajo nivel en Kenia en el continente africano (derecha). Fuente: www.paiscircular.cl	66
Figura C8. 50. Ejemplos de diferentes dispositivos disuasores. Fuente: Medidas de mitigación de impactos en aves silvestres y murciélagos (SAG, 2014).....	67
Figura C8. 51. Disuasores de vuelo en el Puente Río Pichoy, tributario del Río Cruces. Fuente: SAESA.....	68
Figura C8. 52. Esquema de un arco de polietileno para la habilitación de un paso de fauna (arriba izquierda); esquema de un paso bajo nivel específico para fauna (arriba derecha); esquema de un paso bajo nivel multifunción, donde se combina la conectividad biológica, así como el paso de ganado y vehículos (medio izquierda); esquema de un paso bajo nivel multifunción, donde se combina y garantiza la conectividad biológica, así como la presencia de un canal de regadío o acequia (medio derecha); esquema de un paso bajo nivel para pequeños vertebrados (abajo izquierda); y esquema de un paso bajo nivel para anfibios (abajo derecha). Fuentes: The Wetland BMP Manual: Techniques for Avoidance and Minimization, Rhode Island Department of Environmental Management Freshwater	

Wetlands Program (2010) para el arco de polietileno; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).....	70
Figura C8. 53. Referencia real de un paso bajo nivel específico para fauna, donde la revegetación facilita la integración del paso en su entorno (izquierda); referencia real de un paso de fauna de tipo arco enterrado grande de concreto para fauna terrestre (derecha).	71
Figura C8. 54. Referencia real de dos pasos bajo nivel que complementa con conectividad vehicular rural. Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).	72
Figura C8. 55. Referencia real pasos bajo nivel para pequeños vertebrados con incorporación de rocas como elementos naturalizantes (izquierda) y ramas secas para facilitar refugio a animales de pequeño tamaño (derecha). Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).	72
Figura C8. 56. Referencia real de un paso bajo nivel para anfibios (izquierda); referencia real de estructura opaca de metal que cumple rol de cerramiento perimetral y guía a los anfibios hacia el paso bajo nivel (derecha). Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).	73
Figura C8. 57. Esquema de un enrejado perimetral conducente a un paso bajo nivel (izquierda); referencia real de enrejado perimetral conducente a un paso bajo nivel (derecha). Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).	74
Figura C8. 58. Referencia real de enrejado perimetral con adaptaciones para jabalí, evitando que su actividad de excavación modifique la permeabilidad del enrejado (izquierda); referencia real de enrejado perimetral con adaptaciones para lince ibérico, evitando que al escalar o saltar pueda sortear dicho enrejado (izquierda). Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).	75
Figura C8. 59. Referencia real de doble enrejado de diferente ancho para evitar el paso de mamíferos pequeños en su parte más baja (izquierda); esquema de un enrejado con refuerzo tipo visera en ángulo de 45°hacia el exterior (derecha). Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).	75
Figura C8. 60. Esquema que muestra distintas opciones de señalización de paneles mediante franjas verticales. Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).	76
Figura C8. 61. Referencia real de enrejado perimetral pintado de color amarillo contrastante (izquierda) y Cerramiento anticolisión para murciélagos de 5 m de altura y malla de simple torsión en una línea de alta velocidad (derecha). Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).	77

Índice de tablas

Tablas Capítulo 8

Tabla C8. 1. Estrategias de diseño ecosistémico descritas. Fuente: Elaboración propia.	18
Tabla C8. 2. Resumen de estrategias y su justificación para aplicar. Fuente: Elaboración propia.	46
Tabla C8. 3. Tipos de revestimientos de orillas que combinan infraestructura verde (ej. revestimientos vegetales), mixta (ej. gaviones con vegetación) y gris (ej. enrocado). Fuente: Traducción propia de: Roca & Simm. 2017. Green Approaches in River Engineering.	59
Tabla C8. 4. Materiales de leñosos utilizados para la protección de orillas. Fuente: Traducción desde Scottish Environmental Protection Agency (SEPA) 2020. “Sustainable Riverbank Protection”.	62
Tabla C8. 5 Matriz de soluciones de diseño ecosistémico y los Atributos Ecológicos Clave (AEC) buscan abordar. Fuente: Elaboración propia.....	78

Siglas y acrónimos

- AA Aspecto ambiental.
- AEC Atributo ecológico clave (de cada objeto de protección).
- AI Área de influencia (de cada objeto de protección).
- BBPP Buenas prácticas.
- CEHUM Centro de Humedales Río Cruces.
- FGI Factor generador de impacto (de acciones de la obra).
- MMA Ministerio de Medio Ambiente.
- MOP Ministerio de Obras Públicas.
- MP Mercado Público.
- OP Objeto de protección (del humedal).
- SEA Servicio de Evaluación Ambiental.
- SEIA Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.
- TDR Términos de Referencia (del estudio).

RESUMEN EJECUTIVO | Informe Volumen III

La relación entre obras viales y fluviales con humedales produce una serie de alteraciones potenciales o Factores Generadores de Impacto (FGI) que producen Aspectos Ambientales (AA). A su vez, los AA generan Cambios en el Humedal (CH). En muchos casos los CH, entendidos como alteraciones potenciales, no pueden ser abordados solamente por Buenas Prácticas (BBPP), ya que modifican permanente el humedal y, por ello, se requiere replantear la relación de la obra con el humedal mediante el diseño de la misma.

Modificar o replantear el diseño requiere un esfuerzo sustancial, puesto que modifica el acervo técnico con el cual se han realizado tradicionalmente obras comunes como puentes, terraplenes y diversas conservaciones fluviales, entre otras. Lo anterior involucra un desafío en torno a, por ejemplo, las especificaciones técnicas, cubicaciones, dimensionamiento de costos y búsqueda de contratistas adecuados. Sin embargo, la nueva legislación (Ley 21.202) así como la jurisprudencia que se desprende de esta, apunta a una necesidad de moverse en esa dirección y adoptar soluciones de diseño que sean compatibles con la funcionalidad y viabilidad ecológica de los humedales. Un aspecto positivo es que existen muchas experiencias internacionales implementadas que posibilitan esta transición, ya sea mediante el estudio de referentes o intercambio técnico. De lo anterior se desprenden dos hechos clave. Primero, que existen soluciones técnicamente factibles y por lo tanto implementables a través de una institución como el MOP y, segundo, que se observa en el contexto internacional una transición evidente hacia diseños compatibles con la ecología de humedales. Algunas de estas experiencias cuentan con una larga data tal como el caso de EEUU a partir de los años ochenta y otras más recientes como las experiencias en la Unión Europea. Todas estas estrategias de diseño se enmarcan en nuevas categorías de infraestructura –infraestructura verde, infraestructura azul, infraestructura verde-azul– que utilizan Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) para dar continuidad a las funciones ecológicas que sostienen a un ecosistema, a la vez que proveen funciones y servicios de infraestructura para necesidades humanas.

Este volumen aborda una serie de estrategias de diseño con consideraciones ecológicas para el desarrollo de obras que consideren atravesos sobre humedales, manejo de cauces y pasos de fauna. Estos tres grupos de estrategias consideran, a su vez, doce estrategias específicas.

- Las **obras de atraveso** buscan asegurar que portear de forma segura las crecidas de diseño y, al mismo tiempo, conservar los procesos naturales del cauce. Esto incluye mantener la conectividad hidrológica a lo largo de toda la sección transversal, el régimen de sedimentos y material leñoso y el régimen de saturación que sustenta la flora y fauna del humedal. Además, busca asegurar la conectividad biológica, permitiendo el paso de fauna que habita en el humedal atravesado.
- Las obras de **manejo de cauces** tienen el propósito de asegurar la estabilidad y funcionalidad de los lechos de cauces. Estos lineamientos permiten, no solo mitigar los efectos adversos de las obras, sino también promover la recuperación de procesos ecológicos clave, como el balance natural de sedimentos, la funcionalidad de las orillas y el establecimiento de vegetación ribereña. Estos lineamientos resuelven los problemas para los que están diseñadas las obras tradicionales como la erosión de riberas y estabilidad del cauce. En algunos casos, se pueden adaptar, inclusive, como defensas fluviales para cumplir con la funcionalidad requerida

- Los **pasos de fauna** corresponden a estructuras diseñadas para facilitar el cruce seguro de animales a través de vías de transporte, contribuyendo a la conectividad ecológica y reduciendo la mortalidad por atropellos, y la generación de riesgos humanos asociados a colisión entre vehículos y animales.

Para cada grupo de estrategia se definen lineamientos generales y problemas comunes asociados a su implementación. Luego, cada una de las doce estrategias específicas considera una descripción, lineamientos de diseño y referentes con fotografías o esquemas que permiten entender el diseño en contexto de uso. Finalmente, se presenta una matriz de resumen de las estrategias, indicando los Objetos de Protección (OP) y Atributos Ecológicos Clave (AEC) de los humedales que son capaces de abordar.

CAPÍTULO 8 | Catastro de principios y criterios de diseño ecosistémico

8.1 Introducción

Este capítulo presenta lineamientos para tres⁴ grupos de estrategias de diseño ecosistémico en obras viales y fluviales del MOP:

Tabla C8. 1. Estrategias de diseño ecosistémico descritas. Fuente: Elaboración propia.

Grupos de estrategias	Estrategias específicas
Atravesos sobre humedales con funcionalidad ecológica.	Arcos abiertos
	Cajones abiertos
	Cajones modificados
	Alcantarillas en planicie de inundación
Manejo de cauces	Mejoramiento de la sinuosidad del cauce
	Mejoramiento del lecho del cauce
	Revestimientos vegetales
	Uso de árboles y ramas en riberas erosionables
Pasos de fauna	Dispositivos disuasores de vuelo
	Pasos bajo nivel
	Rejas para guiar hacia pasos de fauna
	Rejas o panales perimetrales

Este catastro de estrategias sistematiza experiencias implementadas en Chile y en otros países. La presentación de cada categoría de estrategias busca entregar una lectura rápida para comprender el diseño de las estrategias, la etapa en el ciclo de vida de la obra en que se implementan, los errores frecuentes y referentes de diseño. Las estrategias de diseño ecosistémico abarcan aspectos prácticos como, por ejemplo, el ancho de alcantarillas para asegurar la conectividad hidro-geomorfológica en construcciones sobre humedales de tipo río, el tipo de materiales que utilizar para manejo de cauces, entre otros. Además se presenta una matriz cruzada que indica qué Atributos Ecológicos Clave (AEC) son abordados con cada estrategia.

En la etapa de diseño de proyecto y estudios de factibilidad, el MOP tiene la posibilidad de orientar el diseño con técnicas que mantengan las condiciones del humedal. Uno de los objetivos de incorporar estrategias de diseño de manera temprana, es velar por el cumplimiento de algunos de los criterios mínimos de sustentabilidad (Reglamento Ley de Humedales Urbanos DS 15):

- Resguardar las características ecológicas y el funcionamiento.
- Régimen hidrológico superficial y subterráneo de los humedales urbanos.
- Uso racional de los humedales urbanos.

⁴ Cabe destacar que se agregaron dos categorías, puesto que los TdR consideran sólo obras de cruce.

A continuación, se explica cómo las estrategias pueden aportar a los criterios mínimos de sustentabilidad de la Ley de Humedales Urbanos.

Resguardar las características ecológicas y el funcionamiento: Los cursos de agua son, naturalmente, corredores biológicos, por lo cual su protección y restauración ayuda a “mejorar la conectividad biológica en, y entre, humedales urbanos adyacentes” (Decreto 15 Reglamento Ley 21.202). Las obras del MOP generan acciones con impactos como la socavación y el desgaste.

- **Atraviesos:** Permiten el paso de agua, sedimentos y nutrientes, manteniendo procesos ecológicos esenciales. Reducen la fragmentación de hábitats, conservando la conectividad entre ecosistemas acuáticos y terrestres.
- **Manejo de cauces:** Estabilizan márgenes y previenen la erosión, reduciendo impactos negativos en hábitats acuáticos y ribereños. Restauran la capacidad del cauce para soportar flujos naturales, favoreciendo la biodiversidad asociada. Las acciones en el cauce deben considerar cómo mantener o mejorar el régimen de sedimentos y la estabilización de las orillas. En muchos casos, la restauración de cauces implica el re perfilado de orillas. Esto es necesario cuando los canales han profundizado mucho, formando cárcavas o incisiones en el relieve y de esta manera se desconectan de la zona inundable. Para mantener la continuidad de un hábitat de ribera funcional, con estratos vegetales diferentes y graduales, se pueden diseñar estrategias que consideren el re perfilado de orillas y uso de materiales vegetales.
- **Pasos de fauna:** Conectan hábitats fragmentados, permitiendo el movimiento de especies y evitando la pérdida de biodiversidad. Integran elementos que replican características naturales, como flora nativa y estructuras orgánicas.

Régimen hidrológico superficial y subterráneo de los humedales urbanos: Las características geomorfológicas como la pendiente y el ancho del cauce estructuran de qué manera el agua se mueve. Se debe considerar un diseño final de cauce que pueda responder a la velocidad y volumen de agua y sedimentos natural del cauce. El régimen hidrológico considera la cantidad de agua (nivel, superficie o volumen) y su estacionalidad. Se apunta a combinar una protección de las características actuales y a la recuperación en caso de que esté degradado el humedal. La protección se enfoca en las riberas y el lecho con buena funcionalidad ecológica (por ejemplo, retención de sedimentos, generación de hábitat) y la recuperación debe establecer una pendiente, profundidad y ancho del lecho adecuado para el balance natural de sedimentos.

- **Atraviesos:** Garantizan la continuidad del flujo hidrológico al diseñarse con materiales permeables o estructuras abiertas. Minimizan alteraciones en la infiltración y recarga de acuíferos, preservando los ciclos hídricos naturales.
- **Manejo de cauces:** Mantienen la conectividad entre el humedal y su entorno, garantizando el transporte de agua y sedimentos. Evitan la desconexión entre el cauce y las zonas de inundación, preservando su función reguladora.

- **Pasos de fauna:** Diseñados para no obstruir flujos hídricos ni interrumpir procesos de infiltración y recarga del suelo. Favorecen la circulación de agua entre zonas húmedas, asegurando la estabilidad hidrológica.

Uso racional de los humedales urbanos: Las estrategias de diseño ecosistémico en cauces permiten compatibilizar la construcción y mantención de obras MOP con el uso racional de los humedales urbanos. En este sentido, las obras que apuntan a la conectividad vial y desarrollo urbano sostenible pueden incorporar técnicas y elementos de diseño que incorporen variables sociales, económicas y ambientales.

- **Atraviesos:** Promueven soluciones basadas en la naturaleza, que combinan funcionalidad y protección ambiental. Facilitan el tránsito humano y vehicular sin comprometer los valores ecológicos del humedal.
- **Manejo de cauces:** Un manejo integrado equilibra las necesidades humanas con la protección de los ecosistemas. Se reducen riesgos asociados a inundaciones, beneficiando tanto a las comunidades como al ecosistema.
- **Pasos de fauna:** Compatibilizan infraestructura y conservación, demostrando un enfoque sostenible. Reducen conflictos entre desarrollo urbano y conservación, promoviendo beneficios compartidos para la biodiversidad y las comunidades humanas.

8.2. Lineamientos generales para el diseño de atravesos sobre humedales con funcionalidad ecológica

El objetivo de este tipo de infraestructura es asegurar que los atravesos puedan portear de forma segura las crecidas de diseño y, al mismo tiempo, conservar los procesos naturales del cauce. Esto incluye mantener la conectividad hidrológica a lo largo de toda la sección transversal, el régimen de sedimentos y material leñoso y el régimen de saturación que sustenta la flora y fauna del humedal. Además, busca asegurar la conectividad biológica, permitiendo el paso de fauna que habita en el humedal atravesado. En este sentido, estas estrategias de diseño permiten el sustento del Objeto de Protección (OP) agua, fauna y ecosistema.

El primer paso para seleccionar un atraveso adecuado es caracterizar cauce según sus características hidrogeomorfológicas. Como mínimo se deberán identificar las secciones y los anchos respectivos del **cauce activo**, donde se pueden identificar el ancho para flujos bajos y el ancho para crecidas ordinarias y el **ancho de cauce lleno**. También será útil conocer el ancho de planicie de inundación (ver **Figura C8. 1** y **Figura C8. 2**). Esta clasificación podrá venir desde el análisis de las características hidrogeomorfológicas y se podrá relacionar con los resultados de un modelo hidráulico de inundación para vincular estos anchos a diferentes periodos de retorno o frecuencia de inundación.

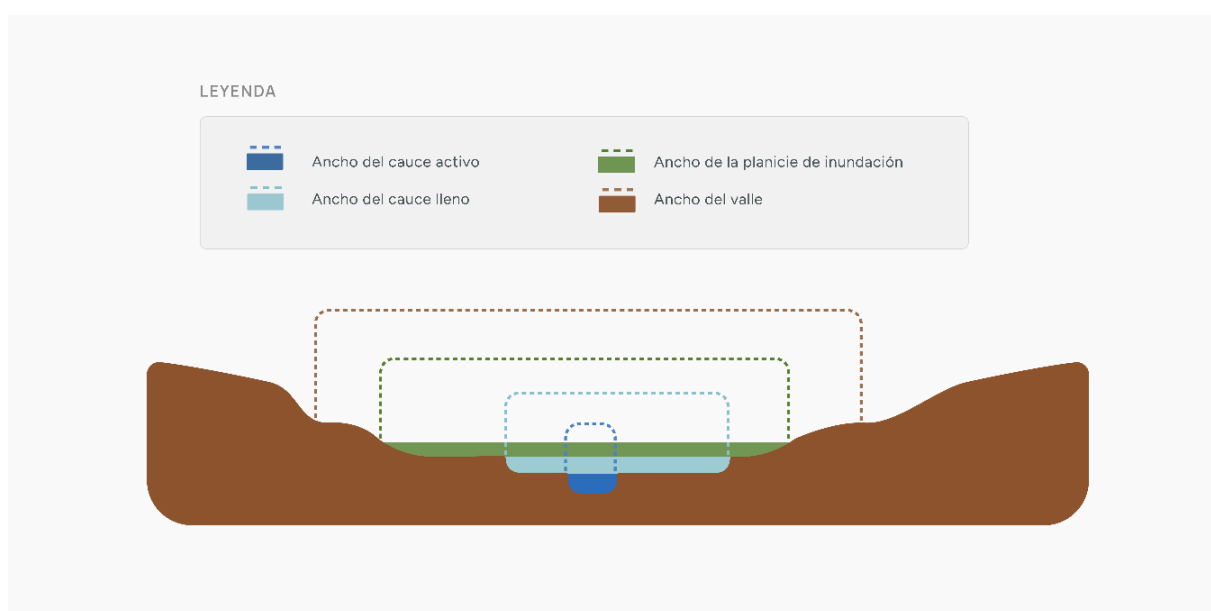


Figura C8. 1. Anchos de cauce representativos de una sección transversal tipo. Fuente: Elaboración propia.



Figura C8. 2. Ancho del cauce activo (Canal de flujos bajos y crecidas ordinarias) y ancho del cauce lleno en un estero pequeño. Fuente: <https://www.fws.gov/alaska-culvert-design-guidelines>.

Por otro lado, se deberá conocer la **geometría planar** del cauce (**Figura C8. 3**). Por lo general, las soluciones presentadas en este capítulo son aplicables a canales relativamente estables. Aun así se pueden hacer algunos ajustes y adaptaciones para cauces dinámicos. Para cauces con múltiples canales y altamente dinámicos se deberá apuntar a atravesos tipo puentes o con una gran **sección transversal** libre.



Figura C8. 3. Geometría planar de cauces. Fuente: *Elaboración propia*.

Según las características del atraveso es posible adoptar diferentes grados de conectividad hidrológica y biológica (**Figura C8. 4**). Siempre que sea posible, la infraestructura del atraveso debiera ser mayor que el ancho de cauce lleno y mantener la forma y sustrato del lecho natural. Además, de ser necesario, se debe dar espacio para el paso de material leñoso (**Figura C8. 5**). Considerar que atravesos mayores a las crecidas de diseño (i.e., T=100 años) otorgan más resiliencia en aquellas zonas donde se espera un aumento de los caudales.

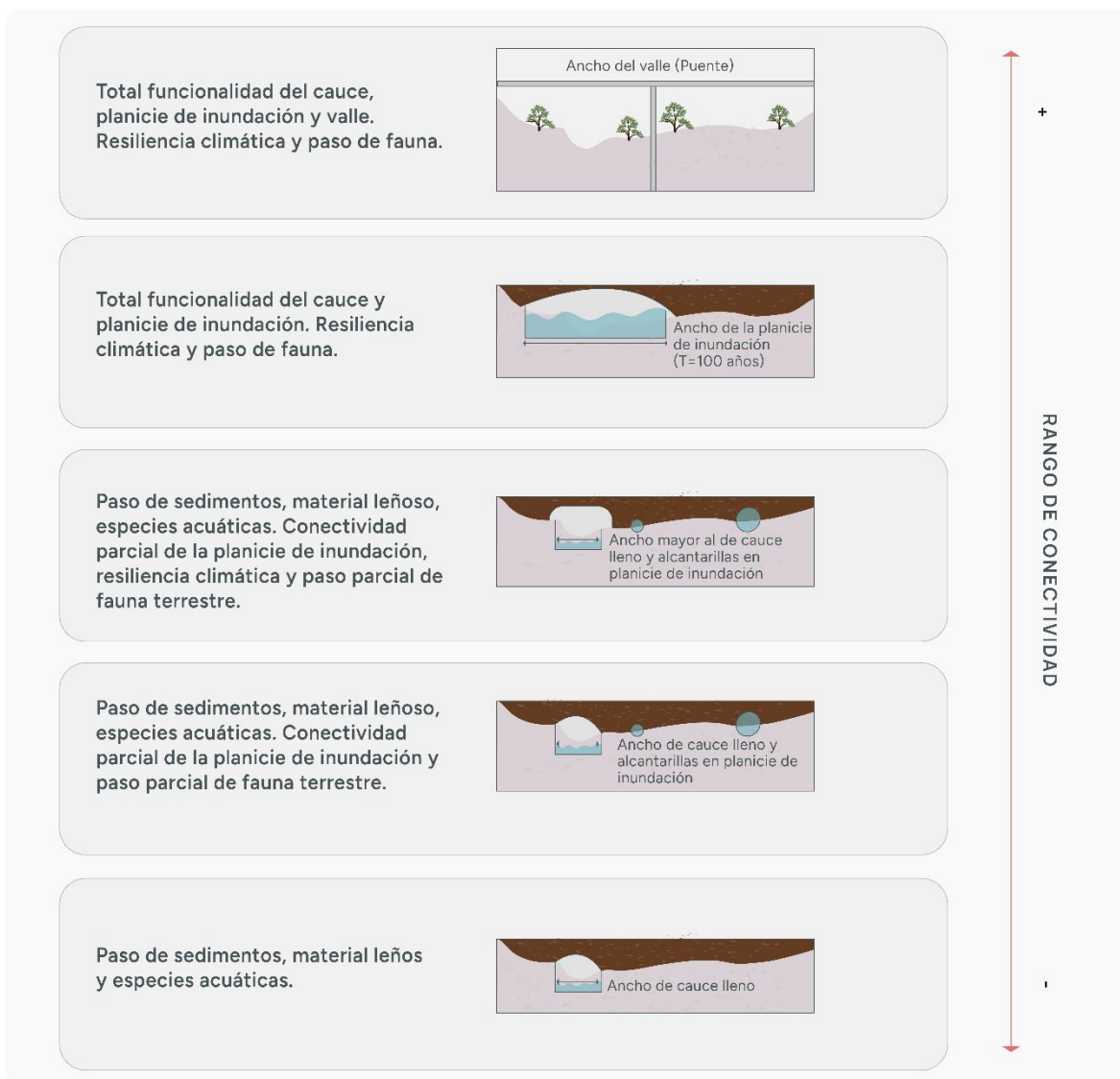


Figura C8. 4. Rangos de conectividad hidrológica y ecológica de diferentes atravesos. Fuente: Elaboración propia en base a <https://www.fws.gov/alaska-culvert-design-guidelines>.

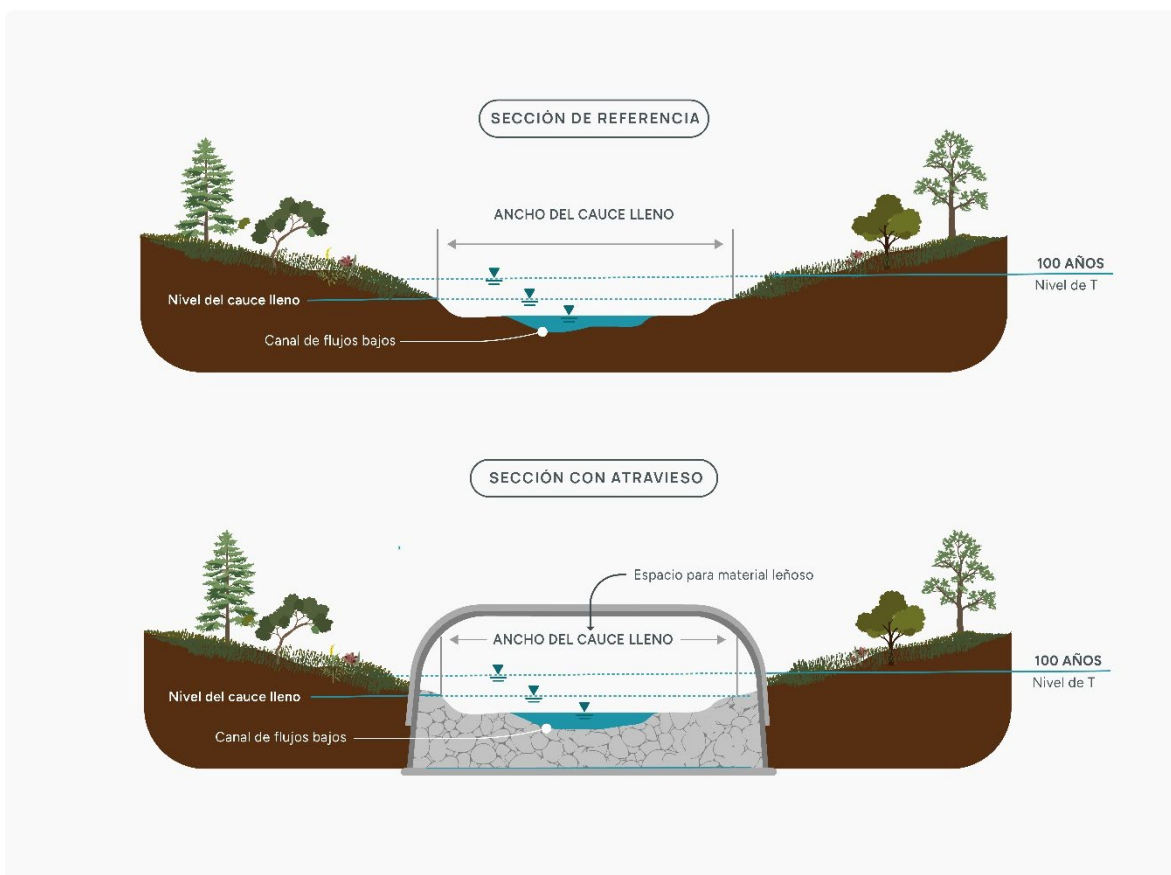


Figura C8. 5. Emplazamiento de un atravesio que respeta el ancho de cauce lleno y sección transversal del cauce. Fuente: Elaboración propia en base a <https://www.fws.gov/alaska-culvert-design-guidelines>.

8.2.1 Problemas comunes de los atravesos

A continuación, se muestran algunos de los principales problemas observados en los atravesos comúnmente utilizados en Chile, del tipo alcantarillas o cajones sin un enfoque ecosistémico.

Atravesos perchados o elevados

Debido a un mal diseño o a procesos erosivos, muchas alcantarillas quedan por encima del nivel del cauce en la zona aguas abajo del atraveso. Esto impide el paso de fauna hacia aguas arriba, además de la erosión o socavación del lecho (ver socavación y erosión de riberas). Para evitar este problema los cruces deben ser de fondo abierto o estar hundidos en el lecho.



Figura C8. 6. Alcantarilla perchada o elevada. Fuente: *Massachusetts Stream Crossing Handbook (Division of Ecological Restoration, 2012)*.

Flujo bajos o altura de agua poco profunda

Los flujos menores a los naturales o altura de agua poco profunda en relación a la del cauce son un problema para los organismos que se mueven con la corriente (macroinvertebrados, peces y anfibios). Para evitar este problema los cruces deben ser de fondo abierto o estar hundidos en el lecho.



Figura C8. 7. Alcantarilla con agua poco profunda. Fuente: *Massachusetts Stream Crossing Handbook (Division of Ecological Restoration, 2012)*.

Sustrato no natural

Los atravesos comunes de hormigón, metal o HDPE no son apropiados para especies que se mueven a través del sustrato del lecho. El sustrato del atraveso debe ser igual o equivalente al sustrato natural del lecho para que provea funcionalidad ecológica.

Socavación y erosión en las riberas

Debido al aumento de velocidad y cambio en el sustrato del lecho es común que ocurra socavación en la zona aguas abajo del atraveso. Además, en atravesos subdimensionados, puede aumentar significativamente la velocidad de escurrimiento provocando erosión en las riberas.



Figura C8. 8. Socavación en la zona aguas abajo de un traveso tipo cajón de hormigón. Fuente: *Massachusetts Stream Crossing Handbook (Division of Ecological Restoration, 2012)*.

Obstrucción

Los atravesos de tamaño insuficiente tienden a obstruirse con material leñoso como troncos y ramas. Esto inhabilita el atraveso y pone en riesgo a la población humana y la infraestructura.



Figura C8. 9. Obstrucción de atraveso tipo alcantarilla por material leñoso. Fuente: <https://ilmenvironments.com/>

Apozamiento o estancamiento

Cuando los atraviesos son demasiado pequeños o bien están ubicados en altura pueden generar un apozamiento no natural en el cauce. El estancamiento puede causar daños a la propiedad, erosión de caminos y márgenes, y cambios significativos en el hábitat aguas arriba.

De forma general se recomienda adoptar las siguientes buenas prácticas para todo tipo de cruces⁵:

- Cuando los cruces sean inevitables, diseñarlos para atravesar una sección angosta del humedal.
- Usar o mejorar cruces existentes para evitar deteriorar áreas que no han sido alteradas.
- Diseñar un cruce que minimice la perturbación y abarque tanto como sea posible el ancho natural del humedal y su planicie de inundación.
- Considerar el uso de cruces prefabricados que permitan completar la instalación con mínimo contacto con el humedal.
- Diseñar cruces que intenten preservar las condiciones de luz existentes y mantengan niveles de humedad del suelo similares a las condiciones naturales.
- Mantener las elevaciones y pendientes laterales existentes en la medida de lo posible.
- Evitar represar el agua en la parte alta del cauce.

⁵ The Wetland BMP Manual: Techniques for Avoidance and Minimization:
<https://dem.ri.gov/programs/benviron/water/permits/fresh/pdfs/wetbmp.pdf>

8.2.2 Descripción de las estrategias

A continuación, se presentan algunas estrategias comúnmente utilizadas que otorgan distintos grados de conectividad y apuntan a evitar los problemas anteriormente señalados.

Arcos abiertos

Descripción

Los arcos abiertos (**Figura C8. 10**) pueden ser de múltiples materiales. Los más comunes y económicos se construyen usando tuberías de metal corrugado con una apariencia “aplastada” o “arqueada”, también es posible construirlos usando hormigón armado. En el caso de que la tubería sea cerrada, la parte inferior de la tubería se entierra permitiendo conservar el sustrato natural. Además, en las zonas laterales se deja espacio o márgenes libre de agua para el paso de fauna terrestre. Este tipo de atravesos otorga conectividad hidrogeomorfológica y biológica.

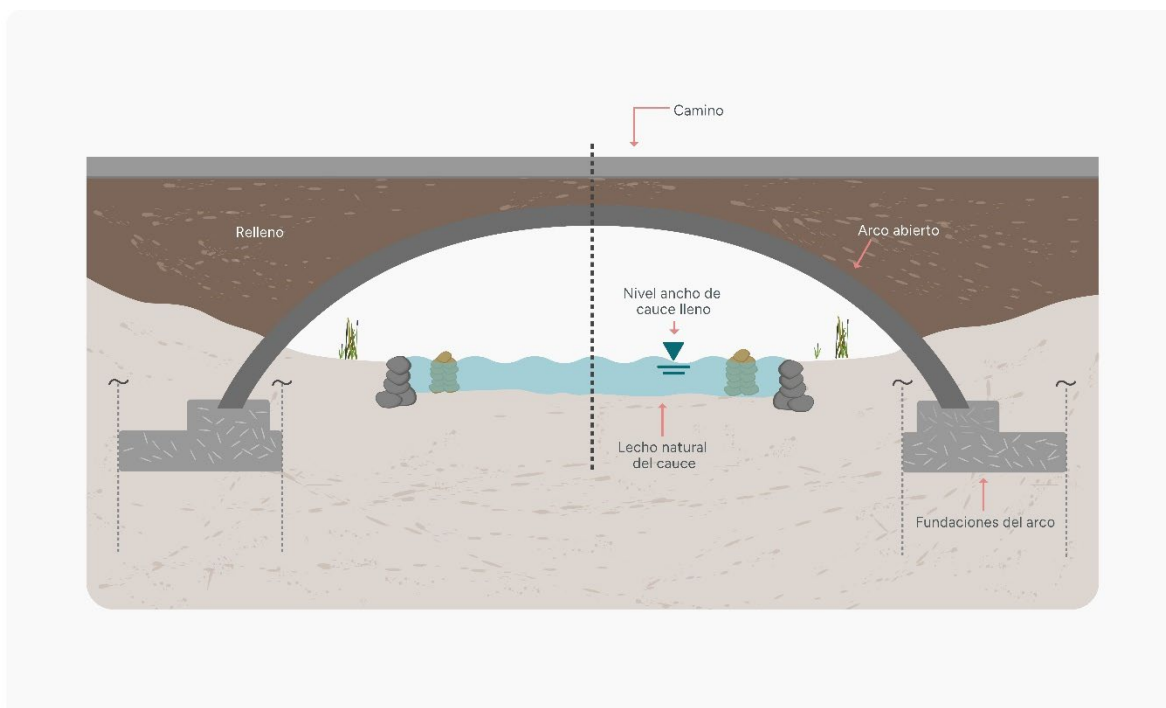


Figura C8. 10. Esquema de un arco abierto. Fuente: Elaboración propia en base a *The Wetland BMP Manual: Techniques for Avoidance and Minimization* (Rhode Island Department of Environmental Management Freshwater Wetlands Program, 2010)

Lineamientos para el dimensionamiento

De forma general se recomienda considerar⁶:

- El ancho del arco debe ser como mínimo 1,2 veces el ancho del cauce lleno.
- Según el tipo de fauna que habita el humedal se debe considerar un ancho seco apropiado en las orillas para el paso de esta.
- La alcantarilla debe estar empotrada o hundida en el cauce un mínimo de 60 cm o un 25% de esta.
- El cruce debe ser ancho y alto en relación a su longitud. Se recomienda un índice de apertura (área de la sección transversal/largo del cruce) mínimo de 0,25 m. Valores óptimos están cerca de 0,5 o 0,75 m.
- Se debe utilizar un sustrato natural en el interior del cruce y este debe coincidir con los sustratos aguas arriba y aguas abajo.
- La velocidad y altura de agua debe ser comparable con las del cauce en la condición naturales.
- Además, se deben cumplir los criterios de diseño comúnmente recomendados en el Manual de Carreteras.

Referentes

La **Figura C8. 11** muestran referentes reales de este tipo de atraviesos. En la **Figura C8. 12** se muestran tuberías prefabricadas cerradas de metal corrugado y hormigón. Según lo explicado anteriormente estas deben ser enterradas para conservar el lecho del cauce.



Fuente: Massachusetts Stream Crossing Handbook (Division of Ecological Restoration, 2012)



Fuente: Resilient Crossings – Landowners Handbook. Fourmile Watershed Coalition et al. (2017)

⁶ Siguiendo los lineamientos de diseño de Massachusetts Stream Crossing Handbook (Division of Ecological Restoration, 2012)



Fuente: <https://www.metalculvertstx.com/>



Fuente: <https://armtec.com/>

Figura C8. 11. Referentes de arcos abiertos de diferentes materialidades. Fuente: Según se indica en cada imagen.



Fuente: <https://metalculverts.com/pipe-arch/>



Fuente: <https://www.designprecast.com/rcap>

Figura C8. 12. Tuberías con sección transversal tipo arco. Al ser cerradas estas deben ser enterradas para conservar el lecho natural del cauce. Fuente: Según se indica en cada imagen.

Cajones abiertos

Descripción

Los cajones abiertos (**Figura C8. 13**) son estructuras rectangulares de concreto las cuales pueden ser prefabricadas o construidas en el sitio. Por lo general, los cajones prefabricados si tienen base (son cerrados), por lo que, para conservar el sustrato natural del cauce, al igual que para el caso de las tuberías tipo arco, esta se entierra por debajo del lecho del cauce.

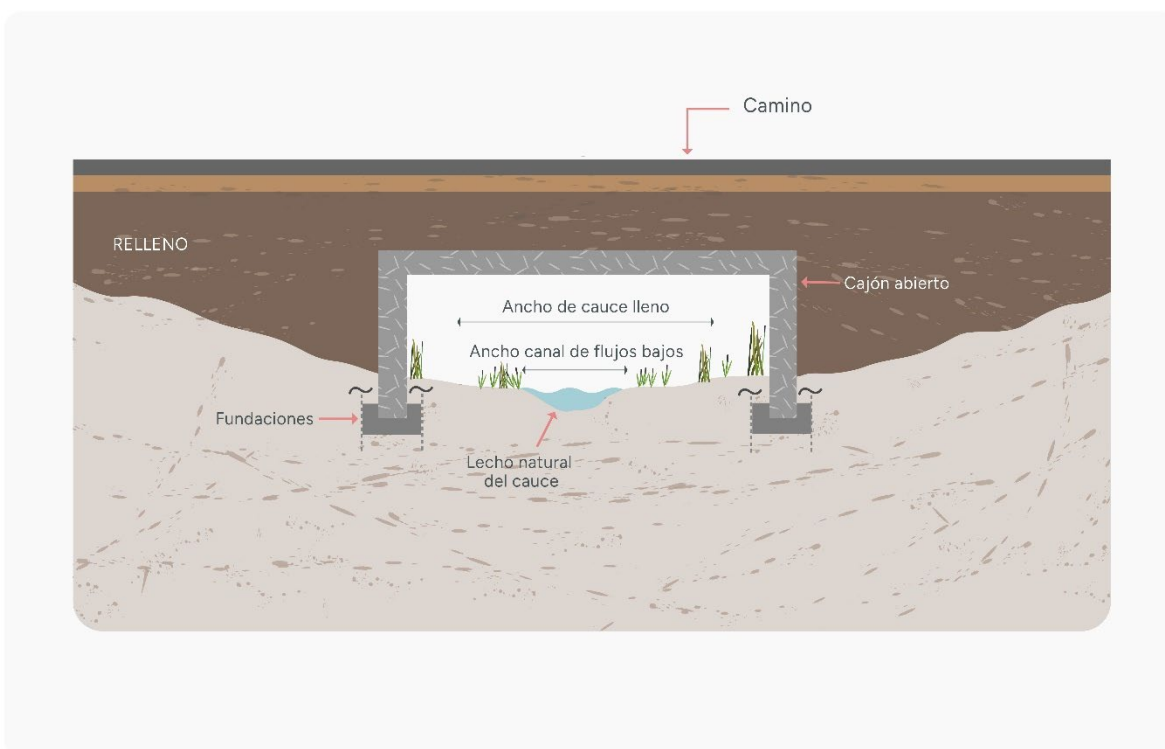


Figura C8. 13. Esquema de un cajón abierto. Fuente: Elaboración propia en base a *The Wetland BMP Manual: Techniques for Avoidance and Minimization* (Rhode Island Department of Environmental Management Freshwater Wetlands Program, 2010)

Lineamientos de diseño

Los lineamientos de diseño para los arcos abiertos son equivalentes a los de los arcos abiertos:

- El ancho del cajón debe ser como mínimo 1,2 veces el ancho del cauce lleno.
- Según el tipo de fauna que habita el humedal se debe considerar un ancho seco apropiado en las orillas para el paso de esta.
- El cajón debe estar empotrado o hundida en el cauce un mínimo de 60 cm o un 25% de esta. Esto cobra especial importancia cuando el cajón es cerrado.
- El cruce debe ser ancho y alto en relación a su longitud. Se recomienda un índice de apertura (área de la sección transversal/largo del cruce) mínimo de 0,25 m. Los valores óptimos están cerca de 0,5 o 0,75 m.

- Se debe utilizar un sustrato natural en el interior del cruce y este debe coincidir con los sustratos aguas arriba y aguas abajo.
- La velocidad y altura de agua debe ser comparable con las del cauce en la condición naturales.
- Además, se deben cumplir los criterios de diseño comúnmente recomendados en el Manual de Carreteras.

Referentes

En la **Figura C8. 14** se muestran algunos referentes de cajones abiertos que permiten conservar el lecho del cauce y también otorgan espacio para el paso de fauna.



Fuente: Resilient Crossings – Landowners Handbook. Fourmile Watershed Coalition et al. (2017)



Fuente: Massachusetts Stream Crossing Handbook (Division of Ecological Restoration, 2012)



Fuente: <https://www.precastmaine.com/>



Fuente: <https://www.precastmaine.com/>

Figura C8. 14. Referentes de atravesos tipo arcos abiertos. Fuente: Según se indica en cada imagen.

En la **Figura C8. 15** se muestran algunos elementos prefabricados que permiten la construcción de atravesos tipo cajón abierto.



Fuente: <https://civilcast.com.au>



Fuente: <https://praxis-ingenieria.com/>

Figura C8. 15. Elementos prefabricados para la construcción de un atraveso tipo arco abierto. Fuente: Según se indica en cada imagen.

Cajones modificados

Descripción

Los cajones modificados (**Figura C8. 16**) corresponden a atravesos tipo cajón convencionales pero que han sido adaptados para permitir el paso de fauna terrestre pequeña. Por lo general lo utilizan mamíferos pequeños, reptiles y anfibios si es que hay suficiente humedad. En estos se implementan pasarelas que permanecen secas en condiciones normales. Se recomienda su implementación de la mano de rejas y rampas que guíen a la fauna hasta este lugar. Considerar revisar la sección 8.4 Lineamiento generales para el diseño de pasos de fauna.

Por lo general corresponden a estructuras cerradas y no enterradas y mantienen la base de hormigón; por esta razón no conservan el lecho del cauce. Esto dificulta el transporte de sedimentos, puede provocar socavación y limita el paso de fauna que se mueve con la corriente.

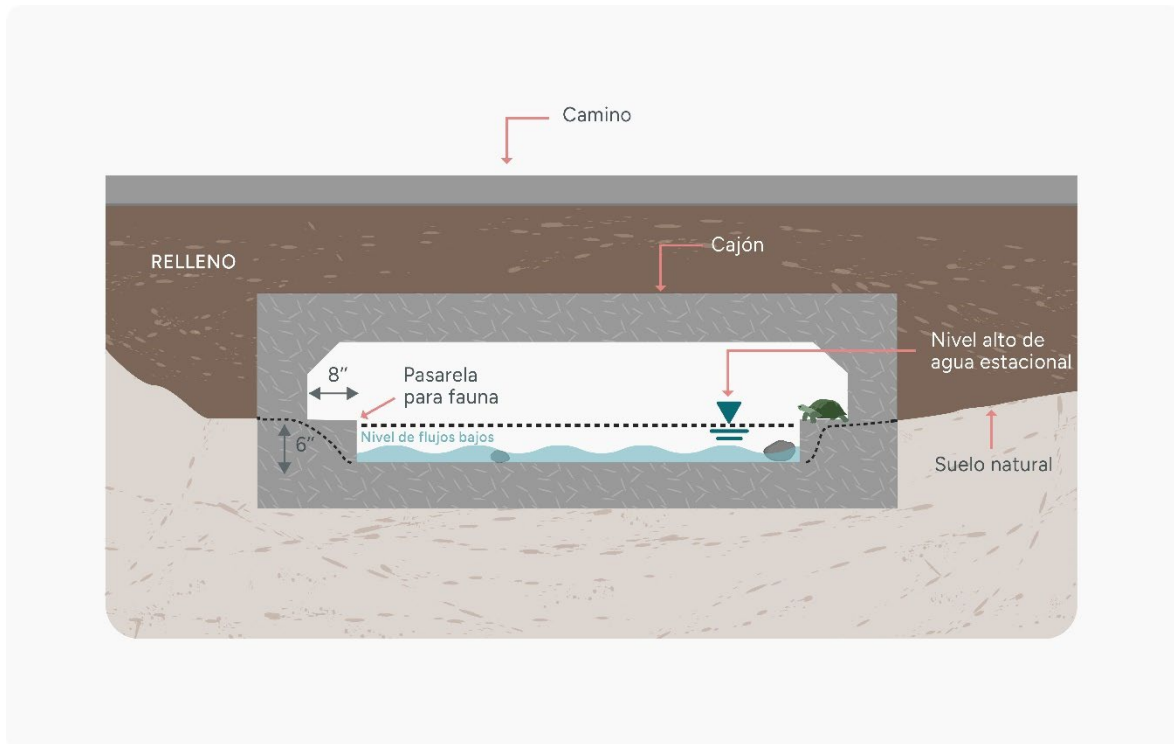


Figura C8. 16. Esquema de cajón modificado para paso de fauna. Fuente: Elaboración propia en base a *The Wetland BMP Manual: Techniques for Avoidance and Minimization* (Rhode Island Department of Environmental Management Freshwater Wetlands Program, 2010)

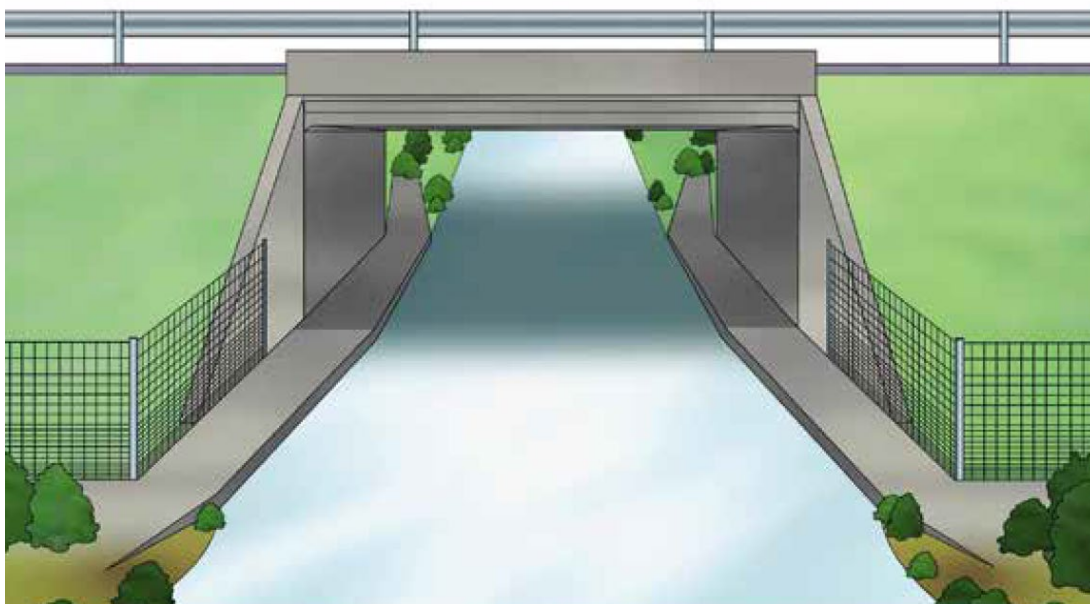


Figura C8. 17. Esquema de cajón modificado para paso de fauna con rampas de acceso y cierre perimetral.
Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).

Lineamientos de diseño

Existen diferentes alternativas (**Figura C8. 18**) para adaptar un cajón y permitir el paso de fauna pequeña. Las más comunes corresponden a estructuras de hormigón continuas con uno o dos niveles o bien pasarelas de madera ancladas.

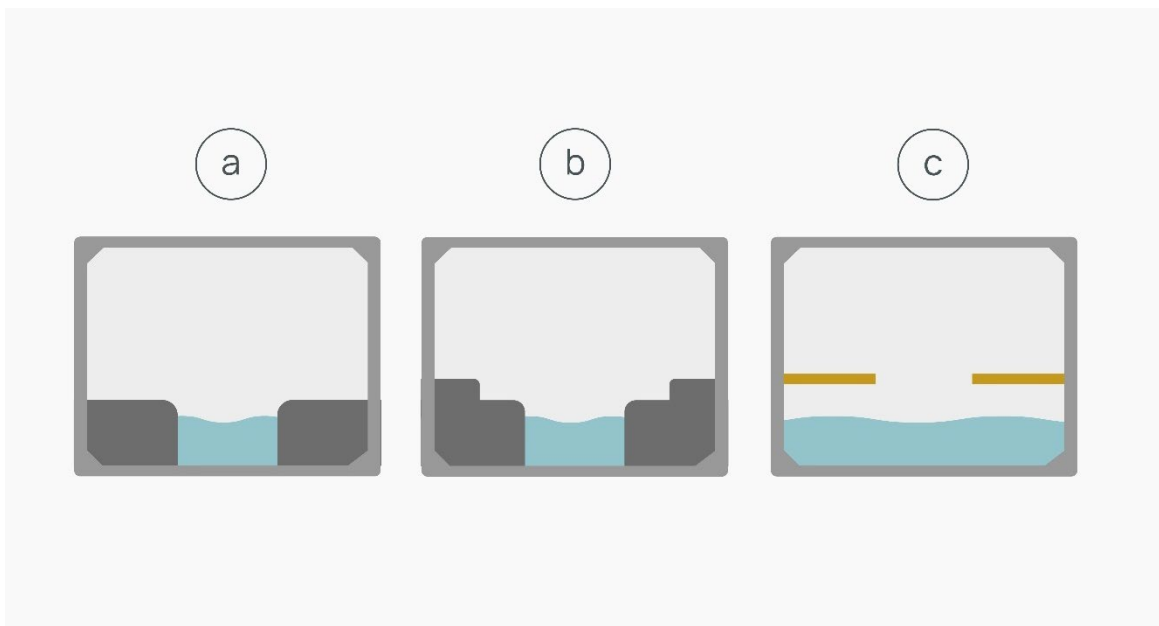


Figura C8. 18. Alternativas para modificar cajones para el paso de fauna. Fuente: Elaboración propia en base a Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).

Algunas consideraciones que se deben tener en cuenta para su diseño⁷:

- La elevación de la pasarela depende de la altura de flujo. Se recomienda que esta se encuentre por encima de la altura de agua frente a crecidas ordinarias.
- Se recomienda un ancho de 50 cm para las pasarelas. Podrán variar según el tipo de fauna que habita el sector.
- Las pasarelas internas deberán estar conectas a rampas exteriores que guíen a la fauna para ingresar al atraveso.
- Las rampas de acceso deberán tener una pendiente de 30° o menor, como máximo de 45°.
- Se debe seleccionar un material adecuado para el paso de fauna como hormigón o madera. El acero corrugado no es compatible para rampas y pasarelas.
- Para facilitar el acceso de los animales desde el entorno hacia las entradas de la estructura deben evitarse los obstáculos generados por escalones, socavaciones u otros elementos.
- Se recomienda implementar cierres perimetrales siguiendo la boca de muro. Estas deben guiar a la fauna hacia las rampas de acceso.

⁷ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015). Prescripciones técnicas para el diseño de paso de fauna y vallados perimetrales.

Referentes

La **Figura C8. 19** muestra algunos referentes de cajones modificados con rampas de ingreso y pasarelas internas.



Fuente: Mitigation measures to reduce impacts on biodiversity (Grilo et al, 2011).



Fuente: <https://gestionagroambiental.com>



Fuente: <https://www.chiapasparalelo.com>



Fuente: <https://www.radiosantaclara.cr>

Figura C8. 19. Referentes de cajones modificados para el paso de fauna. Fuente: Según se indica en cada imagen.

Alcantarillas en planicie de inundación

Descripción

Las alcantarillas en planicie de inundación corresponden a atravesos adicionales al del canal central que otorgan mayor conectividad a lo largo de la sección transversal del cauce frente a crecidas medianas y mayores. Estas crecidas cumplen importantes funciones ecosistémicas como:

- Mantención de hábitats en la planicie de inundación y canales secundarios.
- Permite el acceso de peces a la planicie de inundación.
- Controlan el crecimiento y propagación de especies invasoras.
- Mantienen el ciclo de nutrientes y calidad del agua.
- Dispersan semillas de flora silvestre.

A pesar de que las alcantarillas disminuyen significativamente la sección transversal del cauce, la incorporación de alcantarillas secundarias otorga conectividad hidrológica de forma distribuida en la sección transversal, habilitando el flujo en la planicie de inundación frente a crecidas. Si bien estas alcantarillas pueden funcionar como pasos para algunas especies de fauna, estas no son las indicadas cuando se busca diseñar un atraveso con conectividad biológica. Un esquema en planta y de la sección transversal de un atraveso con alcantarillas en la planicie de inundación se muestra en la **Figura C8. 20**.

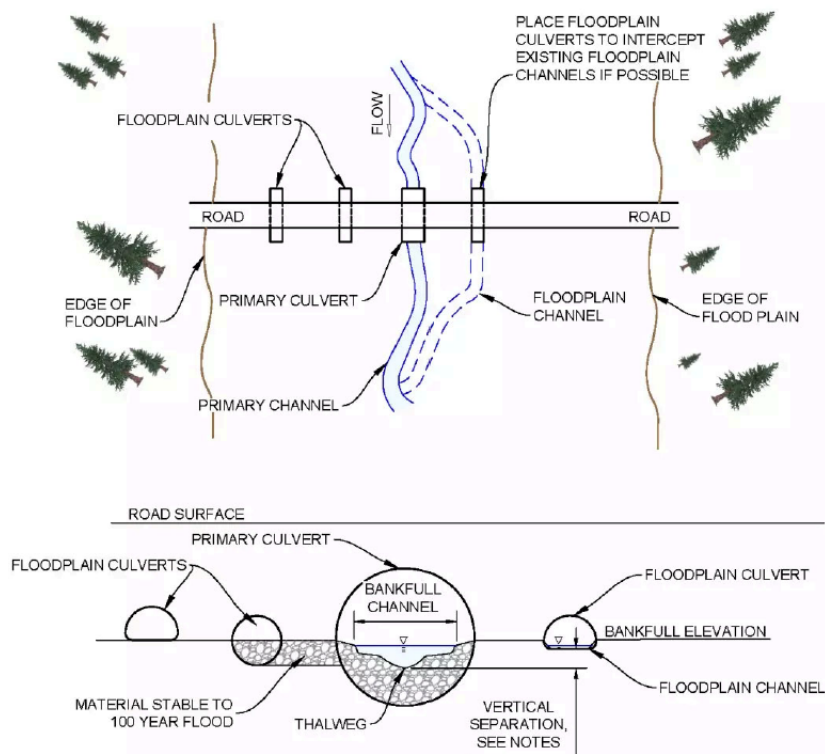


Figura C8. 20. Esquema en planta y de la sección transversal de un atraveso con alcantarillas en la planicie de inundación. Fuente: <https://www.fws.gov/alaska-culvert-design-guidelines>.

Lineamientos de diseño

Algunos lineamientos generales de diseño se listan a continuación⁸:

- Las alcantarillas en planicie de inundación se ubican fuera del ancho de cauce lleno. Estas se diseñan para portear agua solo durante crecidas medianas o mayores. Por esto deben estar separadas verticalmente de la alcantarilla principal. En esta zona se debe utilizar un material estable frente a la crecida de diseño (i.e., T=50 o 100 años).
- Se pueden utilizar alcantarillas tipo arco para maximizar el área saturada en crecidas medianas o al inicio de crecidas mayores.
- Se recomienda evaluar la necesidad del uso de enrocados en las descargas para evitar socavación.
- Se recomienda enterrar la base del tubo. Para secciones tipo arco o cajones rectangulares se sugiere al menos el 20% y para el caso de secciones circulares un 40%.

Referentes

La **Figura C8. 21** muestra referentes de alcantarillas en planicie de inundación para pequeños cauces.



Fuente: Fisheries Engineering and Science.



Fuente: <https://livingnewdeal.org/>

Figura C8. 21. Referentes de atravesos con alcantarillas en la planicie de inundación. Fuente: Según se indica en cada imagen.

⁸ "Culvert Design Guidelines for Ecological Function, U.S. Fish & Wildlife Service". Disponible en: <https://www.fws.gov/alaska-culvert-design-guidelines>

8.3 Lineamientos generales para el manejo del lecho de cauces

Los lineamientos propuestos tienen el propósito de asegurar la estabilidad y funcionalidad de los lechos de cauces. Estos lineamientos permiten, no solo mitigar los efectos adversos de las obras, sino también promover la recuperación de procesos ecológicos clave, como el balance natural de sedimentos, la funcionalidad de las orillas y el establecimiento de vegetación ribereña. Más aún, estos lineamientos resuelven los problemas para los que están diseñadas las obras tradicionales como la erosión de riberas y estabilidad del cauce. En algunos casos, se pueden adaptar como defensas fluviales para cumplir con la funcionalidad requerida. Estos procesos sustentan dos atributos ecológicos clave (AEC) del objeto de protección (OP) “Ecosistema”: la conectividad hidrogeomorfológica y la conectividad del paisaje.

Principales variables geomorfológicas que son relevantes en los cauces de ríos:

- Ancho del cauce activo (ver **Figura C8. 1** y **Figura C8. 2**).
- Ancho del cauce lleno (ver **Figura C8. 1** y **Figura C8. 2**).
- Pendiente del lecho del cauce.
- Granulometría.
- Profundidad.
- Conectividad vertical con la zona hiporréica.
- Conectividad lateral con orillas y zona inundable.
- Presencia de cárcavas o de canales socavados.

Las variables geomorfológicas enumeradas configuran la estructura y el funcionamiento de la **zona hiporréica**. Esta zona es la interacción bi-direccional entre el flujo de agua, el lecho del río y el agua subterránea. Es una transición clave para el intercambio de nutrientes, el filtrado de agua y la generación de hábitat para algas y microorganismos que constituyen la base de las cadenas tróficas en los ríos y humedales. Las principales variables biológicas que sustentan los cauces de ríos con funcionalidad ecológica:

- Macroinvertebrados.
- Fauna (especialmente peces, anfibios, aves).
- Vegetación hidrófila.

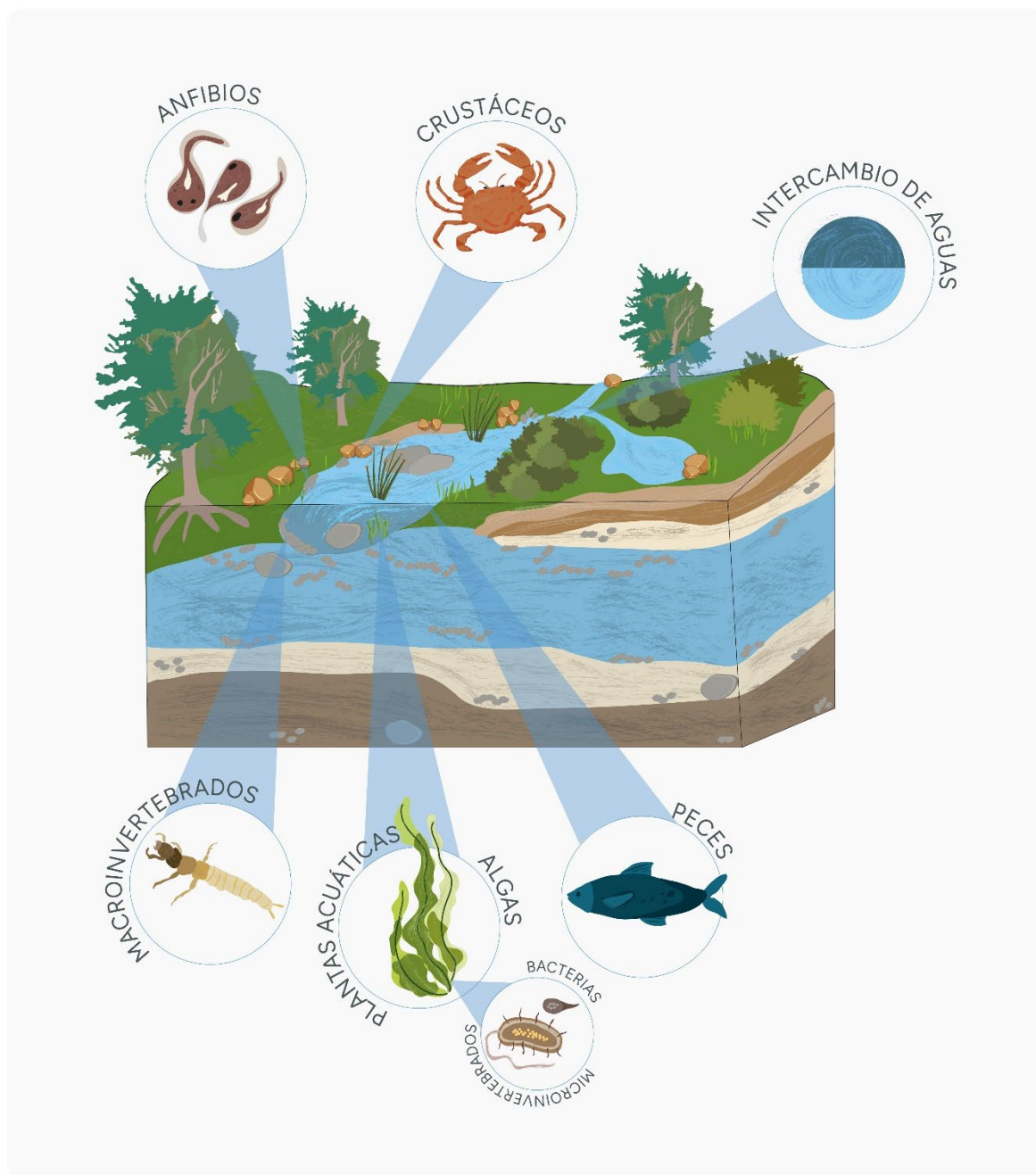


Figura C8. 22. Esquema de los organismos que dependen de la zona hiporréica, o la transición entre el cauce, el lecho del cauce y la napa subterránea de agua. Fuente: Elaboración propia.

8.3.1 Problemas comunes en el manejo de cauces

A continuación, se muestran algunos de los problemas más comunes en el manejo de cauces que pueden ser abordados en la etapa de diseño del proyecto.

Modificación excesiva de la sinuosidad del cauce

La rectificación o reducción excesiva de la sinuosidad reduce la capacidad de las riberas de disipar energía de forma natural, lo que puede aumentar la erosión y estabilidad de orillas, además de incrementar el riesgo de inundación en zonas aledañas.

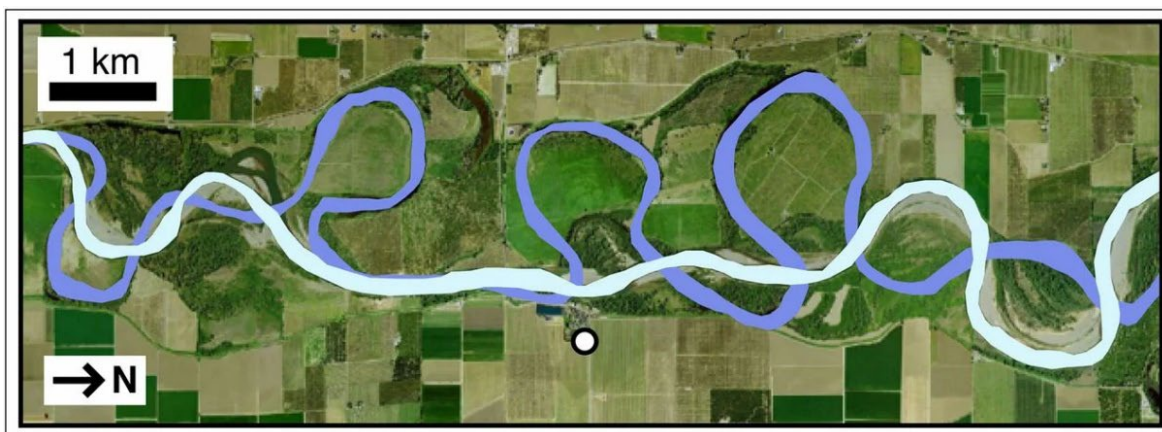


Figura C8. 23. El cambio en la sinuosidad aumenta la velocidad del flujo por el cauce y esto aumenta la erosión hacia aguas abajo. Fuente: Lazarus & Constantine, 2013.

Alteración del lecho

La modificación del perfil y sustrato puede eliminar microhábitats clave para la fauna acuática, disminuyendo la biodiversidad y afectando la estabilidad estructural del cauce. Especialmente problemático es cuando las obras consideran la impermeabilización del lecho del río.



Figura C8. 24. Compactación del lecho, remoción de piedras y bolones, emparejamiento de orillas. Fuente: <https://www.ecrr.org/River-Restoration/Why-restore-rivers>

Falta de vegetación ribereña

La ausencia de un revestimiento vegetal deja a las orillas expuestas a la erosión y reduce el aporte de nutrientes al cauce, lo que afecta tanto la calidad del agua como la biodiversidad y el riesgo de derrumbes o deslizamiento de la orilla.



Figura C8. 25. Riberas desprotegidas debido a una estabilización inadecuada. Fuente: <https://www.ruekertmielke.com/blog/2018/6/26/how-to-protect-urban-stream-and-river-banks>.

Extracción de material leñoso (árboles, raíces y ramas grandes)

La remoción de material leñoso disminuye la estabilidad natural de las orillas, exponiéndolas a una mayor erosión. Además, la pérdida de estos elementos reduce la complejidad del hábitat y limita las áreas de refugio y reproducción para diversas especies acuáticas y ribereñas. En el ejemplo en la **Figura C8. 26** se observa un cauce restaurado del cual se removió todo el material leñoso de gran tamaño como troncos y ramas. El resultado fue la pérdida de conectividad hidrológica y de hábitat. Posteriormente fue necesario diseñar una estrategia de restauración. El diseño utilizó la re introducción de material leñoso para atrapar sedimentos, reparar la socavación y aumentar la relación entre rápidos y pozas. Aunque quizás se vea menos "estético" y más "desordenado", la presencia del material leñoso de gran tamaño es esencial para la estabilidad de las orillas y el lecho y también promueve la conectividad entre el cauce y la planicie de inundación.



Figura C8. 26. Proyecto "Boulder Creek, Antelope, Feather River. En este curso de agua se removieron todos los troncos de gran tamaño y ramas. La medida posterior tuvo como objetivo el devolver la conectividad hidrológica que sea había perdido proyecto de la extracción de material leñoso. Fuente: <https://plumascorp.org>

Inadecuada estabilización de riberas

La estabilización insuficiente o el uso de técnicas inapropiadas en las riberas puede generar una serie de problemas que afectan tanto la funcionalidad del cauce como su entorno (**Figura C8. 27**). La erosión acelerada, resultado del uso de materiales inestables o la ausencia de estructuras adecuadas, incrementa el desgaste de las orillas y favorece deslizamientos (**Figura C8. 28**), lo que contribuye a la turbidez del agua y a problemas de sedimentación aguas abajo. Asimismo, la implementación de materiales artificiales o rígidos puede alterar el flujo natural del agua, afectando el balance de sedimentos y la biodiversidad local. En algunos casos, la introducción de especies exóticas durante prácticas de revegetación desplaza a la flora autóctona, causando desequilibrios ecológicos. Además, la falta de mantenimiento y monitoreo en las etapas iniciales del funcionamiento del cauce mejorado puede resultar en la pérdida de vegetación estabilizadora y el deterioro de las intervenciones realizadas.



Figura C8. 27. Escorrentía de aguas lluvias pone en evidencia la inadecuada estabilización de esta ribera.
Fuente: <https://riverlink.org/urbanization-and-stormwater-runoff/>.



Figura C8. 28. Se observa la socavación de la orilla del cauce por debajo del pie de la canasta de gaviones.
Fuente: *Harring et al. 2023. Sustainable Bank and Channel Stabilization Techniques in Arid Southwest Streams. Wetlands Regulatory Assistance Program*

Obstrucción de conectividad longitudinal

La construcción de estructuras que interrumpen la continuidad del flujo, como muros o canalizaciones, genera barreras físicas que dificultan el paso de organismos acuáticos y limitan la dispersión de sedimentos, lo que compromete el equilibrio natural del cauce. Asimismo, no considerar los efectos de crecidas en el diseño puede provocar el desplazamiento de estructuras naturales, como ramas o árboles, afectando aún más la conectividad longitudinal. Para abordar este problema, las estrategias propuestas contribuyen a la regulación del régimen de sedimentos y a la mejora de la conectividad del cauce. Por ejemplo, la recuperación de la sinuosidad permite la creación de zonas alternadas de acumulación y erosión, mientras que el mejoramiento del lecho del cauce elimina barreras longitudinales y favorece patrones naturales como los *step-pools* (rápidos y pozas). Además, el uso de revestimientos vegetales refuerza la conexión entre el cauce y las riberas, mejorando indirectamente la conectividad longitudinal. Por último, la incorporación de árboles y ramas en las riberas fomenta la creación de zonas de acumulación de sedimentos y la reducción de la velocidad del flujo durante crecidas, contribuyendo a un sistema más resiliente y equilibrado.



Figura C8. 29. Ejemplos de barreras transversales que interrumpen la conectividad longitudinal (a lo largo del cauce). Se sugiere evitar en la etapa de diseño del proyecto. A la izquierda una barrera generada por una represa y a la derecha la barrera la constituye la alcantarilla desconectada del lecho fluvial. Fuente: Derecha – <https://www.nature.org/> ; Izquierda - <https://hewlett.org/openriversfund/>

8.3.2 Descripción de las estrategias

A continuación, se presentan cuatro ejemplos de estrategias para el manejo del cauce con lineamientos específicos y referentes (**Tabla C8. 2**).

Tabla C8. 2. Resumen de estrategias y su justificación para aplicar. Fuente: *Elaboración propia.*

Estrategia	Justificación sobre cuándo aplicar
Mejoramiento de la sinuosidad del cauce	Cauces rectificados
Mejoramiento del lecho del cauce	Cauces revestidos o con sustratos artificiales
Revestimientos vegetales	Orillas erosionadas, pérdida de conectividad
Uso de árboles y ramas en riberas	Orillas erosionadas, socavación, colapso de taludes

Mejoramiento de la sinuosidad del cauce

Descripción

El mejoramiento de la de la sinuosidad en cauces naturales o modificados permite controlar la velocidad del flujo y reducir la erosión en tramos vulnerables. Este diseño busca optimizar el comportamiento hidráulico del cauce y mejorar su estabilidad estructural.

El mejoramiento del lecho del cauce debe considerar debidamente la transición entre el cauce, las orillas y la zona inundable, atendiendo al objetivo de mejorar la conectividad hidrológica y biológica en la dimensión lateral del río (cauce, orilla, zona de inundación), así como la conectividad vertical (caudal del río, lecho del río, zona hiporréica, subsuelo).

Tanto en zonas urbanas como rurales, existe una complejidad en la medida en que hay propiedades privadas colindantes a los cauces. Lo anterior hace que difícil mejorar la sinuosidad por falta de espacio en el eje transversal del cauce.

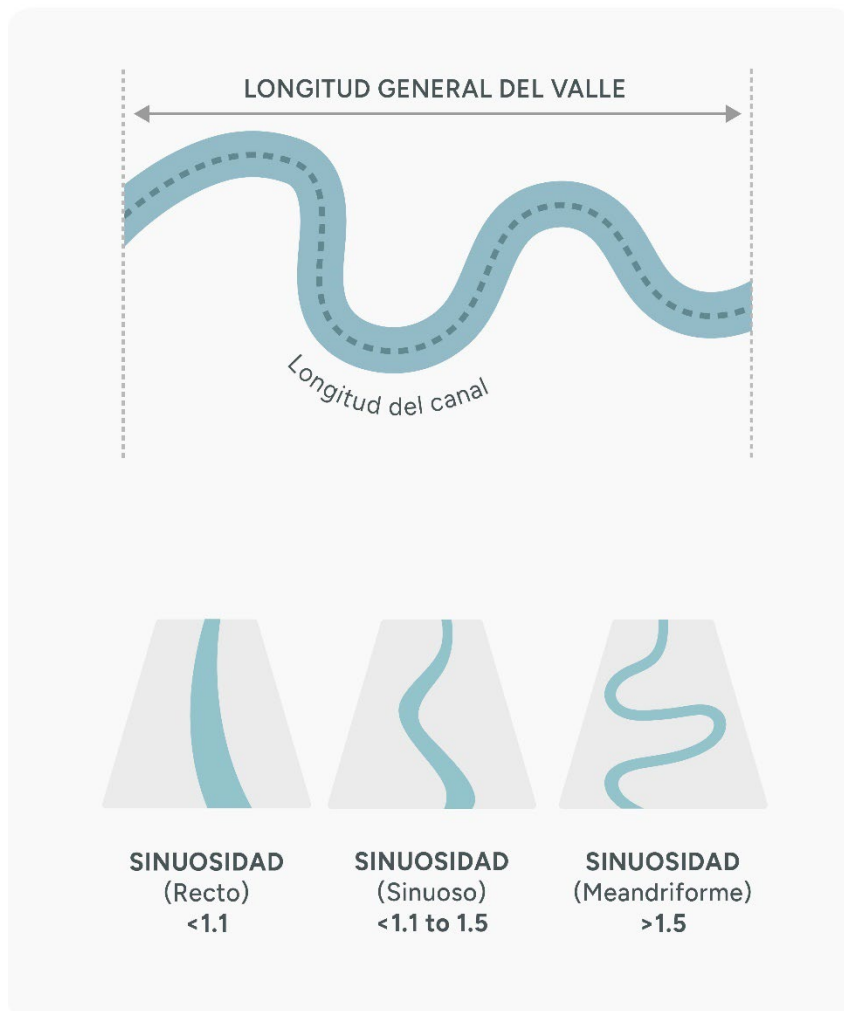


Figura C8. 30. Ejemplos de cauces con diferentes sinuosidades. Este atributo geomorfológico ayuda a disipar la energía del flujo y a reducir la velocidad, minimizando la erosión. Fuente: Elaboración propia en base a Ghosh, Kausik. (2014). Planform Pattern of the Lower Teesta River After the Gazaldoba Barrage, Indian Journal of Geography and Environment.

Lineamientos de diseño

De forma general, para el mejoramiento de la sinuosidad del cauce se recomienda:

- Considerar un ángulo de curvatura de la sinuosidad adecuado que permita un flujo de agua estable y reduzca el potencial de erosión en las orillas.
- Priorizar curvas suaves en lugar de cambios bruscos en el cauce para mantener la coherencia de la corriente.
- Incorporar puntos de vegetación natural en zonas de curvatura para fortalecer las riberas.

Referentes

El ejemplo presentado en la **Figura C8. 31** es una de las primeras experiencias en Estados Unidos de la aplicación de la técnica de restauración de ríos y llanuras aluviales llamada “*plug and pond*”, lo cual se traduce de manera general a “taco y estanque”. Esta técnica consiste en la excavación de sucesivas zonas de retención o “estanques”, intercalados por sitios de “tacos” construidos con rocas o material leñoso. El objetivo de los tacos es retener los sedimentos y producir zonas de “rápidos”. Este diseño imita la dinámica natural de ríos sinuosos. Al reducir la velocidad de flujo del agua e incrementar la capacidad de retención de agua, se genera un efecto favorable en la vegetación y funcionalidad de la llanura aluvial.

(a) 1993



(b) 2012



Figura C8. 31. Primera implementación (2006) de técnica de “*plug and pond*” (“taco y estanque”) en California, Feather River Watershed - Red Clover / McReynolds Creek Project. Fuente: Plumas Corporation. <https://plumascorp.org/>



Figura C8. 32. Mejoramiento de la sinuosidad del cauce. Fuente: Manual of River Restoration Techniques

En zonas urbanas, dónde la zona inundable y los meandros formen parte de una matriz urbana, es posible incorporar elementos de infraestructura verde cómo los presentados a continuación. La incorporación de estos elementos en la matriz urbana permite armonizar diferentes usos.

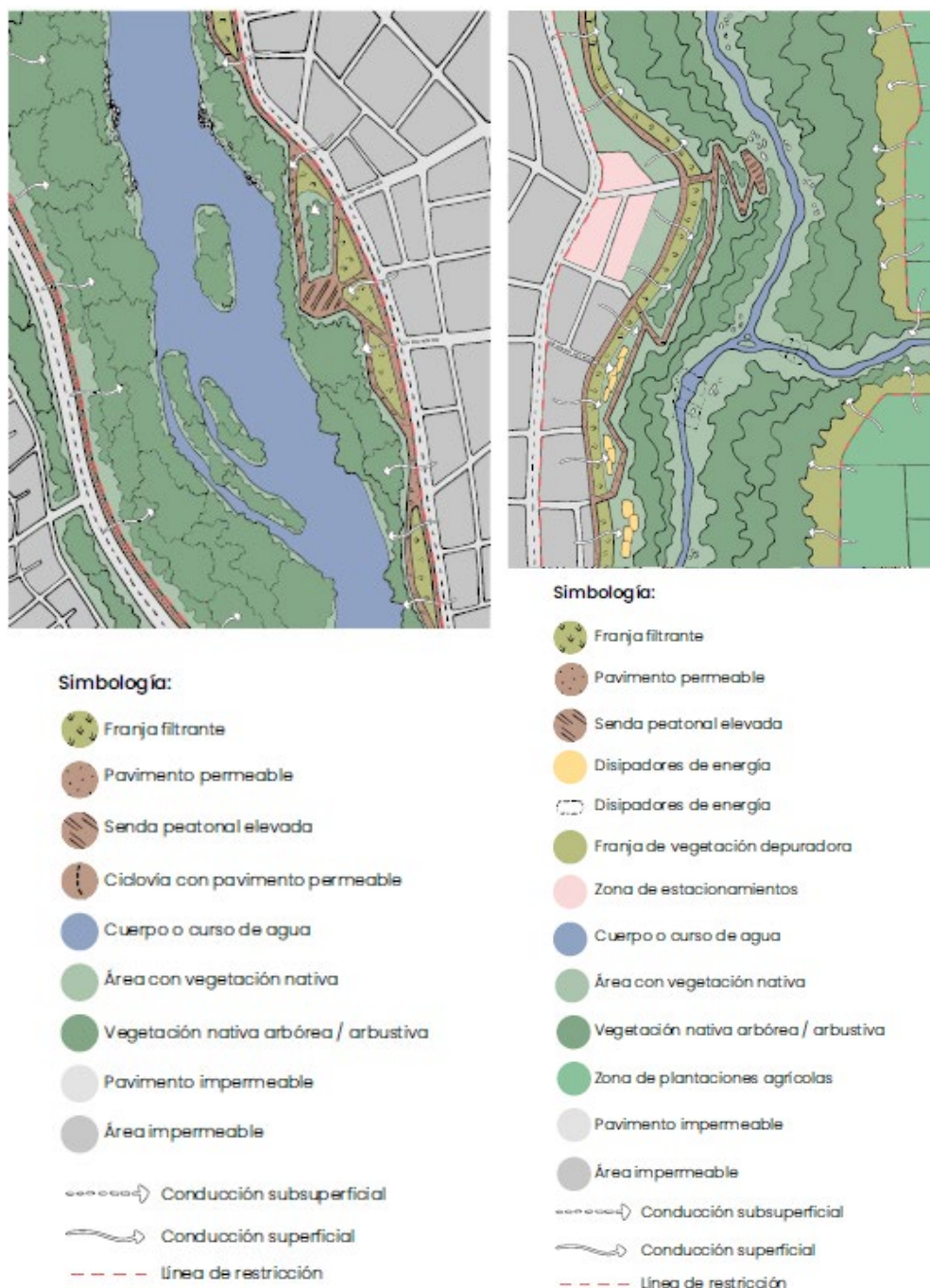


Figura C8. 33. Ejemplo de diseños de infraestructura verde que permitan mejorar la sinuosidad del cauce al mismo tiempo que se compatibiliza con el uso público de un parque urbano inundable. Fuente: Patagua, Fundación Legado Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile. (2021). Ciudades sensibles al agua. Guía de drenaje Urbano Sostenible para la Macrozona Sur de Chile.

Mejoramiento del lecho del cauce

Descripción

La funcionalidad del lecho del cauce consiste en su capacidad de sostener procesos erosivos, restablecer vegetación y mantener un equilibrio en el ciclo de nutrientes. La zona hiporréica es aquella capa de suelo que se ubica en el lecho del cauce y conforma la transición vertical entre el agua superficial de un cauce, el lecho y el agua subterránea. Por lo tanto, el mejoramiento del lecho del cauce busca recomponer esas funciones ecológicas.

Por lo general este tipo de estrategias se aplica en cauces que han sido muy modificados, siendo transformado en gran medida el lecho y la sección del cauce natural. En esos casos, es posible proyectar diseños que consideren “nuevos ecosistemas” (*novel ecosystems*)⁹, es decir, apuntar a recuperar una funcionalidad y equilibrio dinámico del ecosistema, sin necesariamente apuntar a la condición original, la cual en muchas ocasiones no es practicable. Así, el concepto de “nuevos ecosistemas” considera que el sistema natural (humedal) no es prístino o sin intervención pero que, sin embargo, sí puede tener funcionalidad ecológica.

El diseño del lecho del cauce es crucial para mantener el equilibrio del flujo y evitar la sedimentación excesiva o la erosión del suelo. Por lo general, incluye el re perfilado de orillas o del cauce.

La **Figura C8. 34** a continuación, muestra una vista de planta de un río en el que se implementó un re diseño de mejoramiento de cauce para incorporar una secuencia entre pozas (“pool”) y rápidos (“rifles”). Estos elementos tienen diferentes configuraciones y materiales (grava, arena, vegetación) que pueden mejorar la estabilidad y hábitat del lecho (**Figura C8. 35**). Esta secuencia es un resultado de los procesos naturales de transporte de sedimentos en los ríos y es clave para regular la velocidad del flujo de agua, la erosión y acumulación de sedimentos y la formación de hábitat.

⁹ Chapin & Starfield (1997). Time lags and novel ecosystems in response to transient climate change. *Climate Change*, 35:449-461

3.3 Stone riffle

RIVER SKERNE
LOCATION - DARLINGTON, Co DURHAM, NZ301160
DATE OF CONSTRUCTION - AUGUST 1996
LENGTH - 60M
COST - £2,000

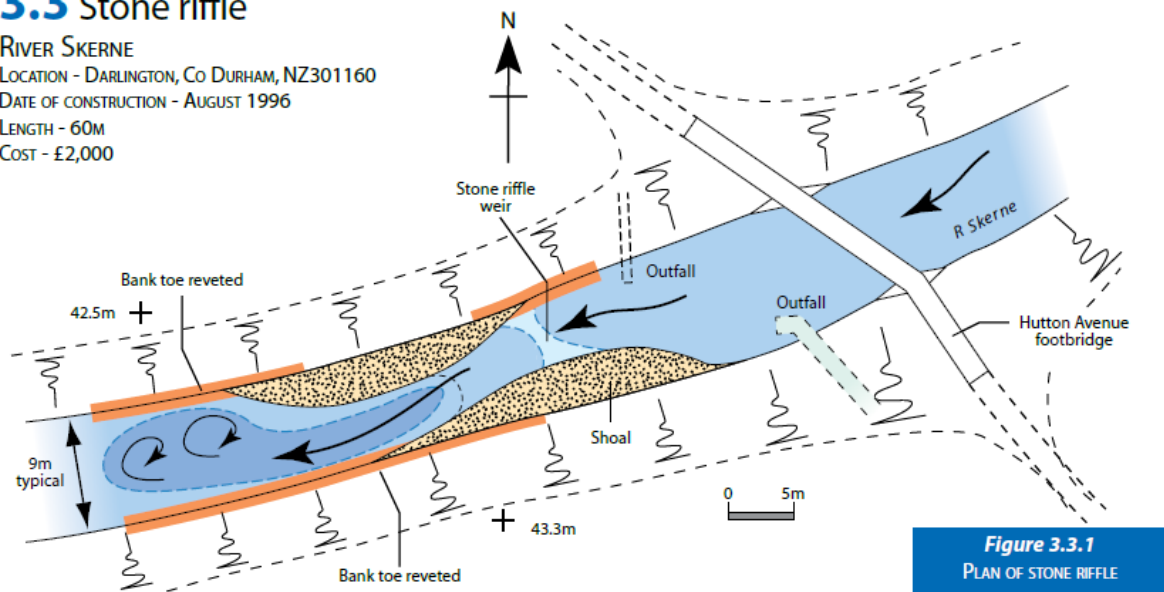


Figura C8. 34. Perfil de vista de planta en un río con mejoramiento del lecho del cauce mediante la incorporación de una secuencia de pozas y rápidos (pools and riffles). Fuente: *Manual of River Restoration Techniques*.

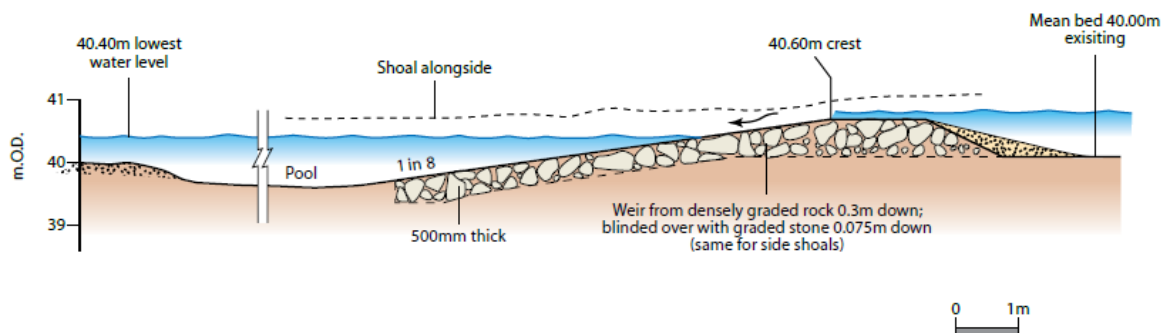


Figura C8. 35. Perfil de vista lateral del río. Se observa la formación de una secuencia de pozas y rápidos ("pools and riffles") con diferentes tamaños de rocas, bolones y grava. Fuente: *Manual of River Restoration Techniques*.

Lineamientos de diseño

De forma general para las estrategias de mejoramiento del lecho del cauce se recomienda:

- Seleccionar materiales que favorezcan el equilibrio entre flujo y sedimentación, tales como gravas y piedras de diámetro controlado.
- Asegurar que la granulometría adoptada no genere socavación y/o erosión
- Aplicar técnicas de estabilización en tramos críticos para prevenir el desplazamiento de sedimentos hacia áreas aguas abajo.

Referentes

Un ejemplo del mejoramiento del cauce, especialmente las orillas, es el proyecto “Integrated Greenhorn Creek” en California. Su objetivo era detener la erosión del lecho y las orillas del río utilizando enrocado y estructuras de escalonamiento gradual para mejorar la generación de hábitat acuático (**Figura C8. 36**).

Sitio 1

(a) Antes



(b) Después



Sitio 2

(c) Antes



(d) Después



Figura C8. 36. Proyecto “Integrated Green Horn Creek” cuyo objetivo fue detener la erosión del lecho y las orillas en dos sitios diferentes (arriba y abajo). (a) En el sitio 1, la situación inicial presenta una orilla severamente socavada con la desconexión total de la planicie. (b) La situación posterior considera un re perfilado de la orilla y aplicación de revestimientos vegetales. (c) En el sitio 2, el lecho presentaba un desnivel de 1.5 desde una plataforma de una represa. (d) El diseño utilizó rocas y bolones para incrementar la rugosidad, además de estructuras escalonadas tanto en el cauce como en las orillas y la planicie. Fuente: <https://plumascorp.org/>

Por otra parte, existen experiencias que han aplicado elementos como rocas de gran tamaño y bolones en un diseño estratégico que considere las características geomorfológicas e hidráulicas del río de interés. Se debe diseñar con el objetivo de atenuar la velocidad del agua y contribuir a un régimen de sedimentos equilibrado (**Figura C8. 37**). El objetivo de esta solución basada en la naturaleza (SBN) es regular el caudal, especialmente en crecidas, o dónde exista infraestructura amenazada por su proximidad al lecho erosionado.



Figura C8. 37. En este sitio se ocuparon rocas de gran tamaño y bolones para un gradiente que atenuara la velocidad del agua Fuente: Bank Protection / Erosion Repair Design Guide. Chapter 1. Water Resources Infrastructure Protection Manual.

Revestimientos vegetales

Descripción

El diseño de obras que apliquen revestimientos vegetales, por lo general consideran también el re perfilado de las orillas para enmendar la erosión existente y desconexión entre el cauce, las orillas y la zona inundable. El re perfilado busca reparar y prevenir el colapso de las orillas. Algunos tipos de colapsos de las orillas se presentan en la **Figura C8. 38**.

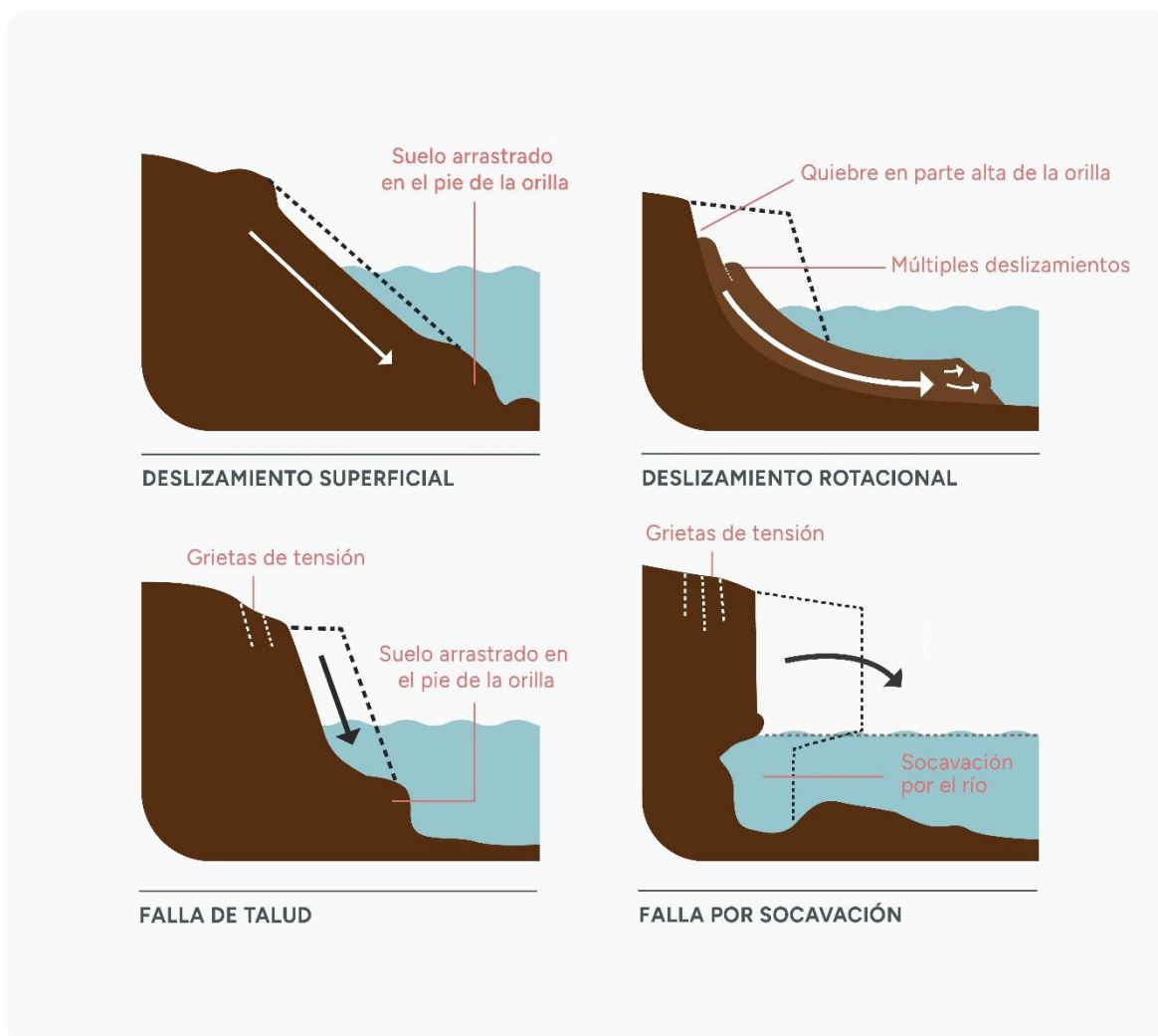
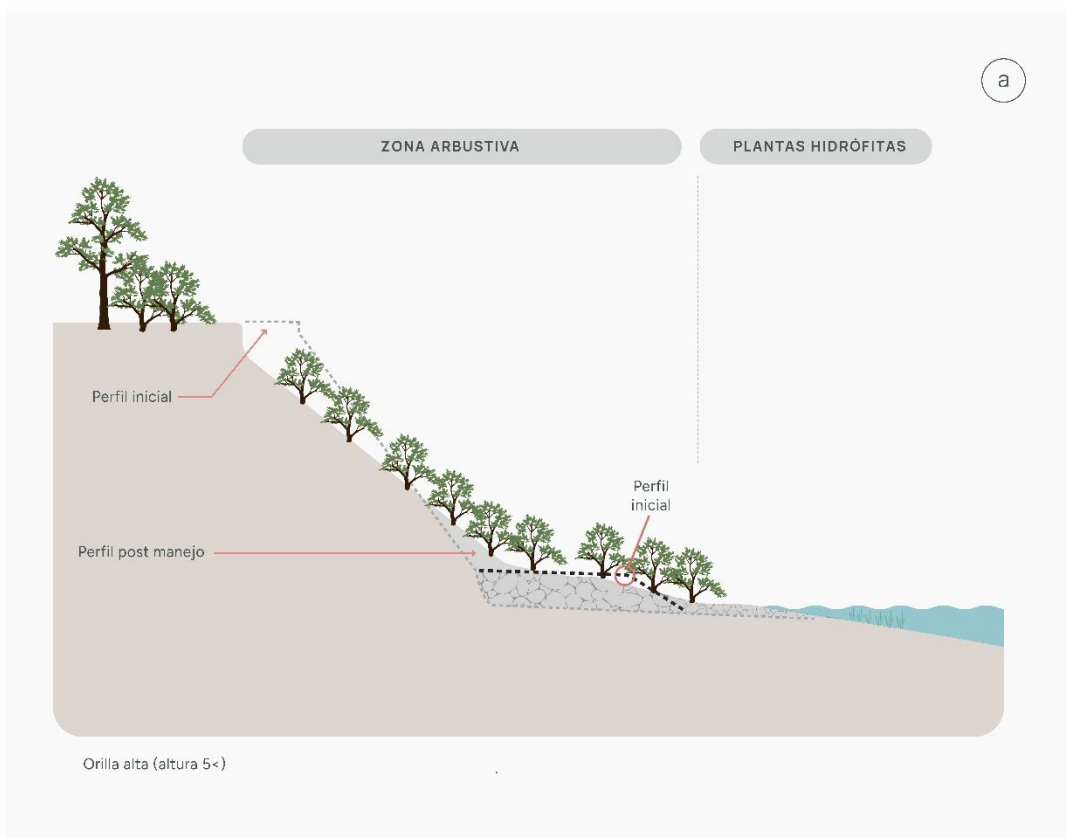


Figura C8. 38. Esquema de tipos de colapso de orillas más comunes. La línea punteada representa el perfil original. Las flechas indican la dirección del movimiento. Fuente: Elaboración propia en base a Roca & Simm. 2017. *Green Approaches in River Engineering*.

Los revestimientos vegetales en los cauces ofrecen una alternativa natural para el control de la erosión, favoreciendo la estabilidad de las riberas y la conectividad ecológica. Como estrategia de diseño contribuye a fomentar la conectividad biológica a escala de paisaje, ya que mejoran la calidad de los cauces y zonas ribereñas como corredores biológicos.

Se sugiere integrar especies nativas adecuadas para diferentes tipos de cauces y tomar en cuenta cómo sus raíces contribuyen a la retención de suelo o podrían interactuar con la napa de agua subterránea. El establecimiento de especies nativas previene el avance de especies exóticas invasoras y contribuye a la recuperación de las funciones de la zona ribereña y zona de amortiguación.

En la **Figura C8. 39** se muestran dos proyectos de re perfilado con revestimientos vegetales: un caso de orillas con alta pendiente y otras con baja pendiente. En ambos casos se muestra el antes y después del perfil, así como la estructura de la vegetación propuesta. La aplicación de revestimientos vegetales debe ser acorde al hábitat requerido por especies de flora locales (tipo de sustrato y humedad) y la estructura de la vegetación que se busca proyectar. Una correcta selección de medidas de diseño debería apuntar a promover la formación de suelo y la sucesión ecológica deseada. La regeneración también depende de factores estructurales como la exposición solar de las orillas, que afecta la radiación y la humedad del suelo.



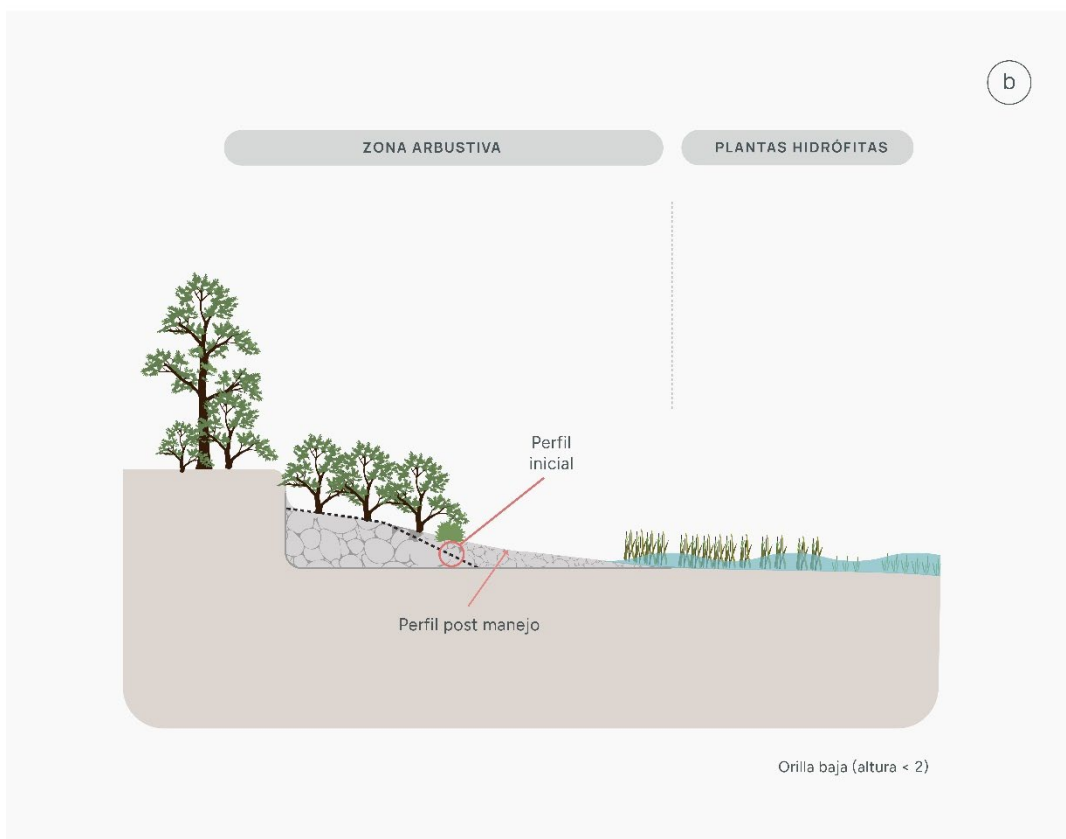


Figura C8. 39. Comparación de perfiles típicos para orillas empinadas (>5m) y orillas bajas (< 2m) con gradiente de vegetación funcional entre orillas y cauces. Fuente: Elaboración propia en Bariteau, et al. 2013. “A Riverbank Erosion Control Method with Environmental Value.”

Lineamientos de diseño

Con respecto al re perfilamiento se sugiere:

- Pendientes suaves (entre 3:1 y 5:1) para reducir riesgos de colapso y mejorar la estabilidad. Este diseño facilita la revegetación natural y el establecimiento de revestimientos vegetales.
- Evaluar las condiciones locales del suelo, como la cohesión y capacidad de carga, y seleccionar especies nativas cuyas raíces refuercen la estructura del sustrato.
- Respetar la conectividad hidráulica entre el cauce y la zona inundable, promoviendo procesos ecológicos como la formación de suelos y la regeneración de vegetación ribereña adaptada a la humedad y exposición solar.

Para el revestimiento vegetal de las riberas se sugiere:

- Utilizar especies nativas con propiedades de fijación del suelo y adaptación a fluctuaciones de agua propias del hidroperiodo del lugar.
- En el eje transversal establecer bandas de vegetación de ancho variable en función de la pendiente del cauce y el tipo de suelo.
- Considerar una zona de amortiguación (buffer) adecuada según el ancho del río.

Con respecto a las estrategias de diseño que consideran el uso de revestimientos vegetales para restauración de cauces, existe información limitada en la tolerancia a la velocidad y pendientes (más aun para la fase de establecimiento final de la medida). En la **Tabla C8. 3** se muestran tipos de revestimientos de orillas que combinan tipos de infraestructura verde, mixta y gris.

Tabla C8. 3. Tipos de revestimientos de orillas que combinan infraestructura verde (ej. revestimientos vegetales), mixta (ej. gaviones con vegetación) y gris (ej. enrocado). Fuente: Traducción propia de: Roca & Simm. 2017. *Green Approaches in River Engineering*.

	Material	Velocidad máxima permitida (m/s)	Pendiente máxima de orilla (grados)	Vida útil diseñada (años)	Observaciones
Infraestructura verde	Vegetación hidrófila	2,4	34	∞	Para altura de bancos < 1.5m
	Colchón o pallet de fibra de coco	2,4	45	3 – 5	Velocidad considera vegetación establecida
	Rollos de fibra de coco	1,8	34	6 – 10	
	Paquetes de rastrojo	2,0	45	30 – 100	El rastrojo vivo tiene mayor resistencia
	Estacas	1,5	45	40 – 100	
	Vegetación	2,4	34	∞	
	Empalizada	1,5	84	40 – 100	
	Material leñoso de gran tamaño	3,0	90	5 – 15	
Infraestructura verde-gris	Sistemas de geo-celdas	Hasta 4,0	60	5 – 20	Velocidad para baja carga sobre las orillas y duración hasta 2 horas
	Bloques de hormigón con vegetación	4,1	34	50	
	Gaviones con vegetación	4,5	-	15	
	Tierra reforzada con vegetación	3,3	90	10 <	
	Colchones reforzados con vegetación	4,2	45	5 – 50	
	Enrocado con vegetación	3,4	34	∞	Velocidad depende del tamaño del enrocado
	Rollos de roca con vegetación	4,0	90	∞	
Gris	Geotextil	4,0	34	50	
	Enrocado reforzado	4,0	N/A	∞	Aplicación al pie del banco

Referentes

A continuación, se presentan algunos ejemplos de revestimientos vegetales y combinaciones de técnicas y materiales para cauces pequeños.

Vegetación hidrófila

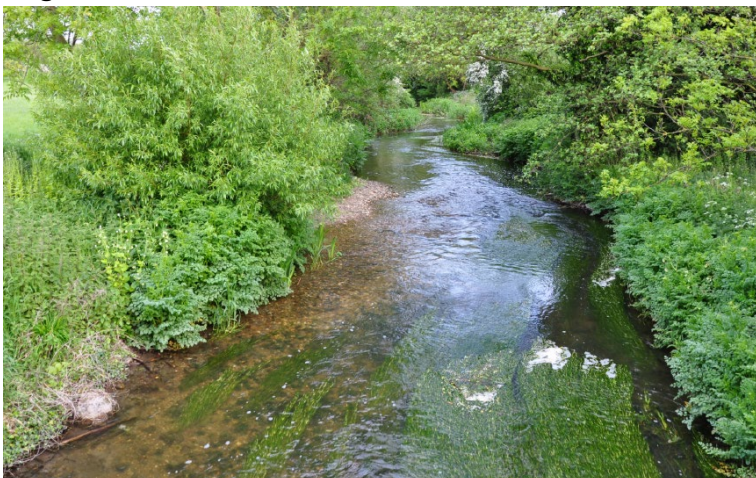


Figura C8. 40. Uso de vegetación hidrófila para revestimiento del cauce y las orillas. Fuente: Frisch & Severi. "Manual of River Restoration Techniques."

Colchón o pallet de fibra de coco



Figura C8. 41. Combinación de colchones de fibra de coco, estacas y paquetes de rastrojo. Fuente: Frisch & Severi. "Manual of River Restoration Techniques."

Rollos de fibra de coco



Figura C8. 42. Combinación de rollos de fibra de coco con vegetación, sujetos por estacas de madera:
Fuente: <https://terraqua.co.uk/lakes-and-ponds/erosion-control/>

Paquetes de rastrojo



Figura C8. 43. Aplicación de paquetes de rastrojo afirmados con estacas de madera. Fuente:
<https://www.wildtrout.org/content/upper-itchen>

Enrocado



Figura C8. 44. Enrocado conservando árboles principales, sin agregar vegetación adicional. Fuente:
https://www.fema.gov/pdf/about/regions/regionx/Engineering_With_Nature_Web.pdf

Uso de árboles y ramas en riberas erosionables

Descripción

El uso de árboles y ramas en riberas erosionables es una estrategia de bioingeniería que combina elementos naturales para estabilizar las orillas de los cauces. Esta técnica aprovecha materiales leñosos para reducir la erosión, disipar la energía del agua y promover la regeneración de la vegetación ribereña. Su implementación no solo protege las riberas, sino que también mejora la conectividad ecológica y la biodiversidad, al crear hábitats para diversas especies. Además, esta solución es adaptable a diferentes escalas y condiciones ambientales, siendo una alternativa sostenible frente a métodos convencionales como muros de contención rígidos. Sin embargo, estas soluciones tienen limitaciones para cauces de mayor tamaño o volumen o con gran variabilidad de caudal.

Tabla C8. 4. Materiales de leñosos utilizados para la protección de orillas. Fuente: Traducción desde Scottish Environmental Protection Agency (SEPA) 2020. “Sustainable Riverbank Protection”.

Concepto	Equivalente en inglés	Definición
Rastrojo	Brash	Cualquiera de los siguientes que se puedan mover fácilmente con la mano: partes de una rama, ramas enteras o partes de tallos de árboles con ramas adheridas.
Paquetes de rastrojo	Brash bundles	Trozos individuales de rastrojo atados lo suficientemente apretados como para formar una estructura coherente pero no tan estrecha como para no dejar prácticamente ningún espacio entre las piezas.
Material leñoso	Large woody debris (LWD)	Troncos, maderas, palos, ramas y demás maderas que caen en arroyos y ríos.
Placa radicular	Root plate	La porción del árbol que normalmente estaría bajo tierra antes del que el árbol es arrancado de raíz.
Taco de raíz	Root wad	La parte inferior del tronco de un árbol con las raíces aún adheridas y la mayor cantidad de tierra posible eliminada para que las raíces queden expuestas. El árbol puede estar vivo o muerto.
Empalizada de vegetación	Willow spilling	Varillas de vegetación (por ejemplo, sauce nativo u otra especie) tejidas entre estacas clavadas en la orilla o en el lecho.

Lineamientos de diseño

El diseño debe priorizar el uso de especies de árboles y ramas nativas, seleccionadas por su resistencia al agua y capacidad de rebrote. Se recomienda emplear estructuras como fascines, gaviones vivos o troncos anclados, que actúen como barreras naturales contra la erosión.

La ubicación de los troncos de árboles debe considerar la dinámica fluvial, incluyendo velocidad del agua, pendiente y tipo de suelo. La combinación de estas estructuras con la revegetación del entorno asegura una estabilización a largo plazo. Además, el diseño debe apuntar a la seguridad hidráulica y regulación de transporte de sedimentos, especialmente en crecidas, para reducir el riesgo a la población humana e infraestructura.

Un ejemplo aplicado consiste en implementar "muros vivos" con árboles de enraizamiento profundo en áreas de alta erosión. También se pueden colocar ramas estratégicamente en zonas de impacto directo del flujo para mitigar la velocidad y proteger las orillas.

Referentes

En el ejemplo a continuación (**Figura C8. 45**) se presenta un esquema de la aplicación de tocones con raíz ("root wad"). Esta instalación se realiza en la orilla externa de un meandro de manera de detener y prevenir la erosión. Se realizan excavaciones con retroexcavadora que permitan enterrar de manera perpendicular o hasta 20° desde la perpendicular, árboles de un par de metros de largo con sus respectivos núcleos de raíz apuntando hacia adentro del cauce. En este diseño es ideal considerar especies con fuerte crecimiento vegetativo, por ejemplo, el sauce chileno (*Salix humboldtiana*) o algunas especies hidrófilas de la familia Myrtaceae.

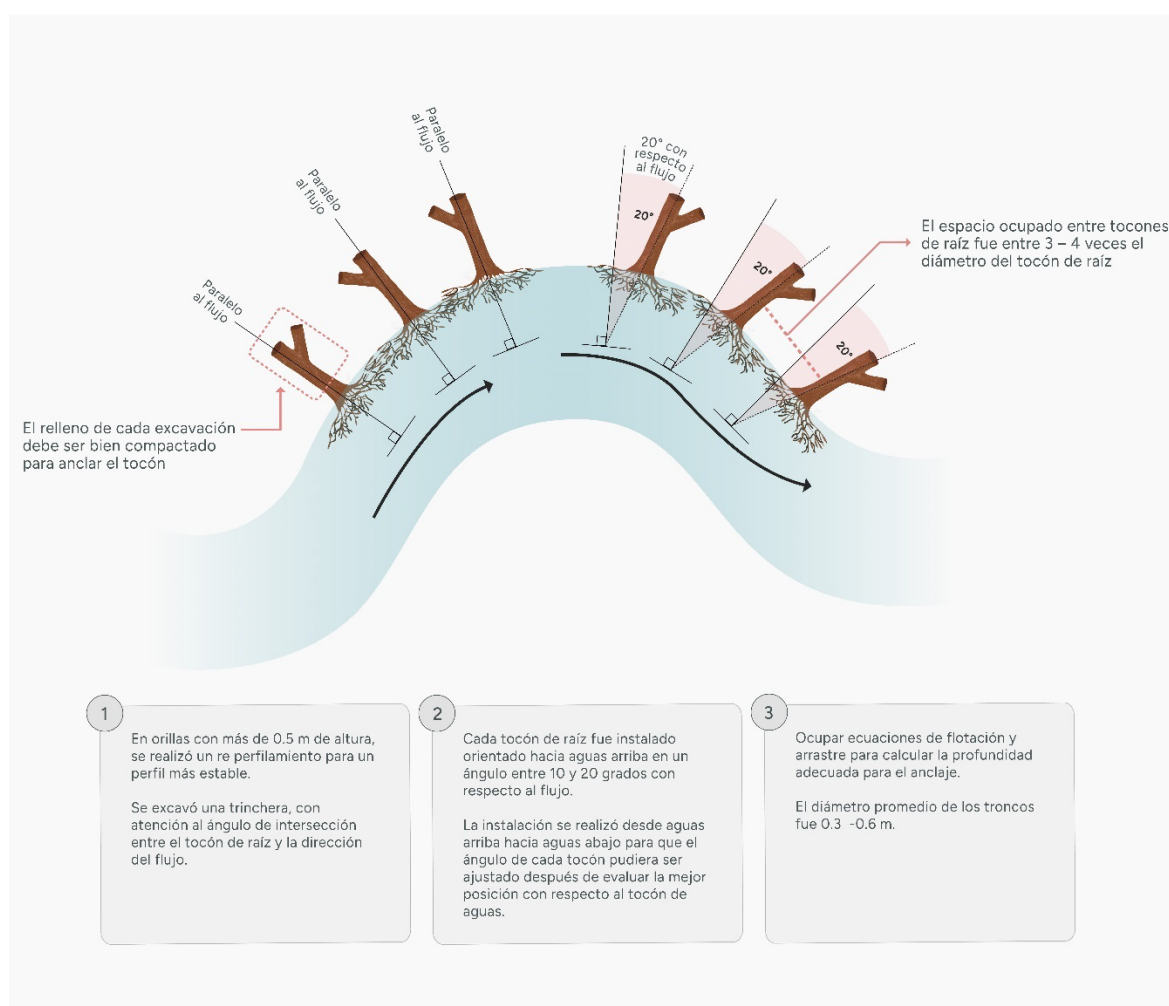


Figura C8. 45. Esquema de uso de troncos con raíz para la estabilización de riberas. Fuente: Elaboración propia en base a *Manual of Restoration Techniques. Riveting and supporting river banks.*



Figura C8. 46. Fotografía de orilla antes y después de la aplicación de tocones con raíz. Izquierda: inmediatamente luego de la instalación (marzo 2004). Derecha: Crecimiento de los tocones dos años después de la instalación (2006). Fuente: *Manual of River Restoration Techniques*



Figura C8. 47. Introducción de troncos, ramas y raíces al interior del lecho del río. Fuente: FEMA, https://www.fema.gov/pdf/about/regions/regionx/Engineering_With_Nature_Web.pdf

8.4 Lineamientos generales para el diseño de pasos de fauna

Las carreteras y caminos constituyen un medio esencial para lograr el transporte terrestre, la conectividad entre personas, localidades, ciudades y el comercio. Sin embargo, las carreteras como ejes lineales constituyen una barrera para el desplazamiento de fauna silvestre, contribuyendo fuertemente a la fragmentación de hábitat. En algunos casos, se reconocen como el factor que constituye mayor amenaza para la conservación de la diversidad biológica. Incluso, en muchos escenarios afecta severamente la seguridad vial, luego de la colisión de vehículo con fauna de tamaño medio a grande.

En el **Capítulo 1** del presente estudio se identificó un gran número de obras de la Dirección de Vialidad que intersectan por lo menos con un humedal reconocido en el Inventario Nacional de Humedales (2023). La mayoría de las intersecciones ocurren en humedales ribereños como ríos (62%), seguidos por humedales palustres permanentes (12%), humedales palustres andinos (5%), humedales palustres tipo turberas (4%), y humedales palustres tipo mallines (3%), entre otros de menor representatividad.

Según registros nacionales de fauna impactada en caminos, que se desprenden de la plataforma científica de registro ciudadano iNaturalist¹⁰, se han registrado más de 1700 atropellos a fauna en todo el territorio nacional, desde 2018 a la fecha. Algunas especies asociadas a humedales que se incluyen en los registros son: especies de aves como lechuza, huairavo, tiuque, pequén, tucúquere, chucao, hued hued, queltehue o trile, tagua, yeco, garzas, entre otras; especies de mamíferos como huillín (en peligro de extinción), zorro, pudú, chingue, coipo, murciélagos, entre otras; y especies de anfibios y reptiles como varias especies de ranas y varias especies de culebras, lagartos y lagartijas (**Figura C8. 48**).



Figura C8. 48. Dos ejemplares de huillín atropellados en infraestructura vial en diferentes sectores de Chiloé, en julio de 2024 (izquierda) y octubre de 2024 (derecha). Fuente: www.soychiloe.cl

El fenómeno de atropello de fauna en infraestructura vial es una problemática infravalorada a nivel global¹¹, no teniendo a disposición datos absolutos, sino más bien datos referenciales. Sin embargo, proyectos emblemáticos en Chile, están considerando progresivamente la incorporación de pasos de fauna en infraestructura pública, como la ampliación del acceso norte y sur a la ciudad de Valdivia, y la doble vía en la Isla de Chiloé. Adicionalmente, en junio de

¹⁰ Plataforma de ciencia ciudadana para el registro de atropellos de fauna en Chile <https://inaturalist.mma.gob.cl/projects/fauna-impactada-en-las-carreteras-y-caminos-de-chile-ficch>

¹¹ Proyecto "SAFE, Stop atropellos de fauna" (España). <https://www.recursosdivulgacion.csic.es/proyectos/safe-stop-atropellos-de-fauna-en-espana>

2024, la Cámara de Diputados de Chile¹², solicitó al Presidente de la República “la formulación e implementación de una política pública cuyo objetivo sea la construcción y regulación de pasos de fauna en el territorio nacional, exigiéndolos en las bases de licitación para la concesión de carreteras y autopistas, según corresponda”.

En la **Figura C8. 49** se muestra un ejemplo de paso de fauna bajo nivel en Kenia para grandes mamíferos como elefantes africanos (*Loxodonta sp.*) y otros mamíferos.



Figura C8. 49. Ejemplo de pasos de fauna bajo nivel en Kenia en el continente africano (derecha). Fuente: www.paiscircular.cl

El desarrollo de una red de transporte más segura y con el mínimo impacto sobre la fauna, se logra desacoplando la intersección de las redes viales –que canalizan el flujo de vehículos–, y las redes de conectividad biológica –que concentran desplazamientos de fauna silvestre–. En este sentido, la habilitación de pasos de fauna en infraestructura vial es una estrategia crucial para mitigar el impacto negativo que las carreteras y obras viales en general, tienen sobre la biodiversidad. Los pasos de fauna son estructuras diseñadas para facilitar el cruce seguro de animales a través de vías de transporte, contribuyendo a la conectividad ecológica y reduciendo la mortalidad por atropellos, y la generación de riesgos humanos asociados a colisión entre vehículos y animales. En esta sección se abordarán estructuras que pueden ser subterráneas, como los pasos bajo nivel, atraviesos de cauce y alcantarillas en planicies de inundación, que además de tener un rol en la conectividad hidrológica y morfológica del cauce, sirven también para la conectividad biológica. También se describirán barreras para guiar el tránsito animal (rejas o paneles) y dispositivos disuasores de vuelo en tendido eléctrico. Su diseño debe adaptarse a las características específicas de los ecosistemas del territorio, las especies presentes y su comportamiento, así como a las características de las obras. Los pasos de fauna aéreos y pasos de fauna sobre nivel no se abordan en este estudio.

¹² Resolución Cámara de Diputados (Chile). Solicita política de pasos de fauna en carreteras. https://www.camara.cl/legislacion/resoluciones/resolucion_votacion.aspx?prmlid=8192#info-ficha

8.4.1 Descripción de las estrategias

A continuación, se describen diferentes estrategias que permiten habilitar pasos de fauna seguros desde el punto de vista de la infraestructura vial y ecosistémico.

Dispositivos disuasores de vuelo

Descripción

Los dispositivos disuasores de vuelo son elementos diseñados para prevenir o reducir las colisiones de aves con elementos de infraestructura como líneas eléctricas, comúnmente vinculadas a la infraestructura vial. Su objetivo es proteger tanto las aves como la infraestructura, reduciendo el riesgo de accidentes y mortalidad de las especies, así como también el deterioro o fallas de los elementos construidos. Estos elementos son especialmente importantes en zonas de intersección entre caminos y humedales, ya que comúnmente los humedales son parte de la ruta de vuelo de muchas especies de aves.

Lineamientos de diseño

El fundamento de instalar este tipo de dispositivos es que contribuyan modificar la trayectoria de vuelo de aves, por lo que deben ser instalados en entre las rutas de vuelo y la infraestructura propia de la obra, como caminos o puentes, y el tendido eléctrico. Adicionalmente, tienden a ser dispositivos permanentes, por lo que deben considerar una mantención que garantice esta temporalidad asociada al plan de seguimiento del proyecto. Ejemplos son la instalación de dispositivos como esferas, cintas reflectante o dispositivos de colores vivos que aumentan la visibilidad del tendido eléctrico, disminuyendo así la probabilidad de colisión con este.

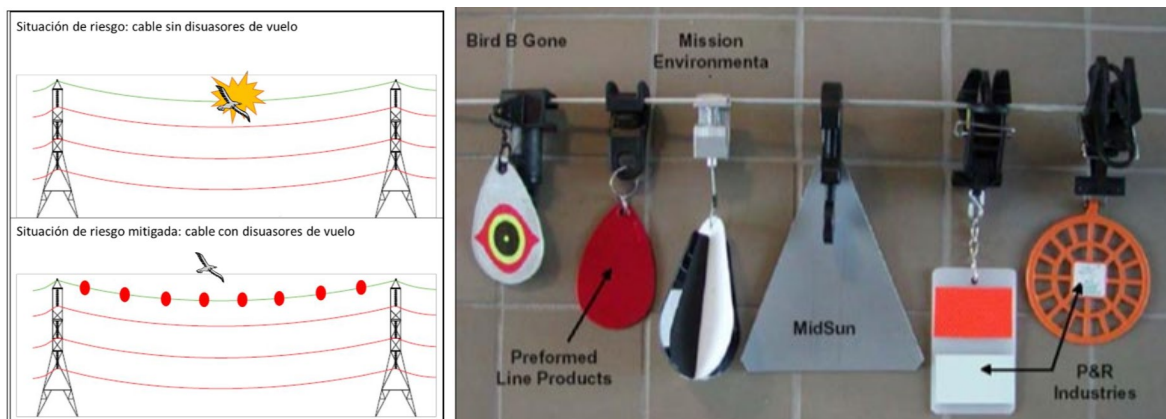


Figura C8. 50. Ejemplos de diferentes dispositivos disuasores. Fuente: Medidas de mitigación de impactos en aves silvestres y murciélagos (SAG, 2014).

Algunos estudios prácticos que se deben realizar es la caracterización de la comunidad de aves presentes en el área, considerando también aquellas especies migrantes que pueden estar exclusivamente en una estación del año. Se debe describir la riqueza, la abundancia relativa y el estado de conservación de cada especie. Adicionalmente, se debe estudiar el comportamiento espacial de los individuos, identificando patrones de vuelo y movimiento.

Referentes

Como se puede ver en la **Figura C8. 50**, hay diferentes alternativas disponibles en el mercado para su implementación en diversos tipos de proyectos. En el mismo sentido, son ampliamente utilizadas en tendidos eléctricos sobre todo en sectores obras tipo puente, en áreas de alta abundancia de aves. La **Figura C8. 51** da cuenta de la implementación de disuasores de vuelo en el Puente Río Pichoy, río que a su vez es tributario ribereño del Río Cruces, área protegida oficial de la Región de Los Ríos, y que mantiene una alta abundancia de especies de aves.



Figura C8. 51. Disuasores de vuelo en el Puente Río Pichoy, tributario del Río Cruces. Fuente: SAESA.

Pasos bajo nivel

Descripción

La habilitación de pasos de fauna en infraestructura vial es una estrategia crucial para mitigar el impacto negativo que las carreteras –y obras viales en general–, tienen sobre la biodiversidad. Los pasos de fauna son estructuras diseñadas para facilitar el cruce seguro de animales a través de vías de transporte, contribuyendo a la conectividad ecológica y reduciendo la mortalidad por atropellos, y la generación de riesgos humanos asociados a colisión entre vehículos y animales. Se diferencia de los atravesos de cauce, arcos, cajones abiertos y alcantarillas dado que los pasos de fauna son estructuras que tienen por exclusivo rol la conectividad biológica, sin embargo, es importante relevar el rol dual que cumplen los atravesos de cauce, y especialmente los arcos y cajones abiertos. Dado que se pueden ajustar a la realidad de la obra, se sugiere revisar también la **sección 8.2** donde se describen estas estrategias, las que se enfocan en permitir la conectividad biológica en conjunto con la conectividad hidrológica.

En este caso, este tipo de estructuras promueve el paso principalmente de fauna terrestre, es decir, mamíferos, aves, anfibios y reptiles, y se ubican bajo carreteras. Deben estar ubicados estratégicamente en zonas de tránsito de animales. Se deben instalar fuera de la red de drenaje evitando que el agua inunde los atravesos. Sus dimensiones dependerán del tipo de animal para el cual se está diseñando.

Los pasos de fauna pueden ser implementados cuando los humedales serán atravesados por obras de infraestructura, o cuando cualquier hábitat de vida silvestre está siendo fragmentado.

Lineamientos de diseño

Al implementarse estructuras de pasos de fauna, es importante primero describir el tipo de vida silvestre que habita en el área, y cuáles son sus rutas de tránsito, a través de investigación y monitoreo. Esta información ayudará a determinar donde localizar los pasos de fauna y que tipo de estructura es la que mejor se acomoda a la realidad ecológica local (**Figura C8. 52**). Sin perjuicio de lo anterior, es seguro asumir que cualquier atraveso vial sobre un humedal –especialmente cauces– se localizará en un paso activo de fauna, por lo que su diseño representa una oportunidad para mantener la conectividad biológica.

Es importante considerar los siguientes lineamientos clave para el diseño de pasos de fauna:

- Los pasos bajo nivel pueden ser de tamaños variables para ser de utilidad para mamíferos, ya que sus dimensiones dependerán del tipo de animal para el cual se está diseñando. Se ha comprobado que, si los individuos de vida silvestre son capaces de ver a través del paso de fauna hacia el otro lado, es más probable que efectivamente lo utilicen.
- Idealmente, los pasos de fauna se deben instalar fuera de la red de drenaje evitando que el agua inunde los atravesos. En el caso de que formen parte de la red de drenaje, se debe considerar que el volumen de agua durante varios eventos de tormenta no sobrepase la capacidad de conectividad biológica de la estructura.

- Respecto a la dimensión del paso de fauna, se propone el concepto de “Apertura Relativa”, dada por el factor entre el largo del paso de fauna, dividido por el ancho o alto de apertura. Para fomentar el paso de una gran variedad de fauna terrestre, se sugiere que las aberturas de los pasos subterráneos tengan un tamaño que proporcione “aberturas relativas” inferiores a 6 u 8. Por ejemplo, si la extensión del paso de fauna es de 20 m, la apertura (ancho o alto) debiera ser aproximadamente de 3 m, dando una apertura relativa de 6,6; o si la extensión del paso de fauna es de 30 m, la apertura debiera ser aproximadamente de 5 m, dando una apertura relativa de 6.
- Para otorgar un paso seguro y naturalizado, al interior del paso de fauna debe garantizarse un buen drenaje para evitar la inundación del paso, y un sustrato natural prefiriendo estructuras de sección abierta como pórticos o bóvedas, garantizando esto último la presencia de vegetación en las áreas más próximas a las entradas del paso de fauna.

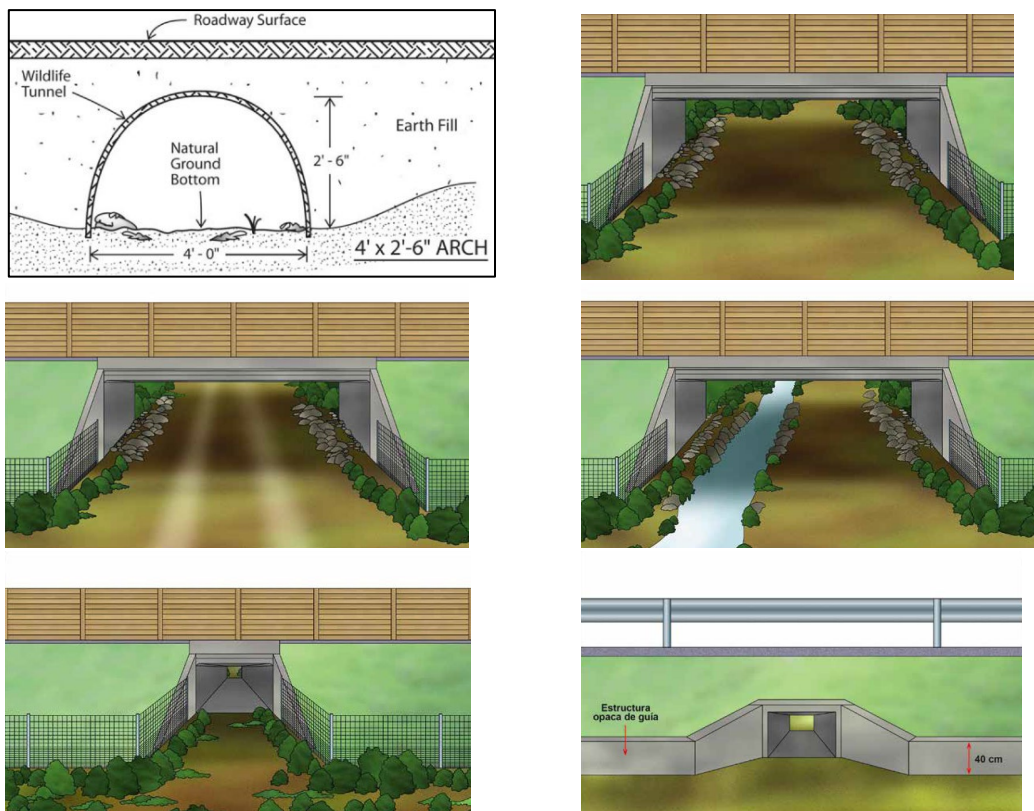


Figura C8. 52. Esquema de un arco de polietileno para la habilitación de un paso de fauna (arriba izquierda); esquema de un paso bajo nivel específico para fauna (arriba derecha); esquema de un paso bajo nivel multifunción, donde se combina la conectividad biológica, así como el paso de ganado y vehículos (medio izquierda); esquema de un paso bajo nivel multifunción, donde se combina y garantiza la conectividad biológica, así como la presencia de un canal de regadío o acequia (medio derecha); esquema de un paso bajo nivel para pequeños vertebrados (abajo izquierda); y esquema de un paso bajo nivel para anfibios (abajo derecha). Fuentes: *The Wetland BMP Manual: Techniques for Avoidance and Minimization*, Rhode Island Department of Environmental Management Freshwater Wetlands Program (2010) para el arco de polietileno; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).

Referentes

La **Figura C8. 52** muestra esquemas teóricos de variaciones de pasos de fauna con diferente objetivo. Se muestra, por ejemplo, un arco de polietileno bajo la superficie de una carretera, construido junto a una zona de acceso de la vida silvestre hacia el humedal. En este caso, se mantiene un suelo natural de tierra preexistente, que permite un fácil desplazamiento de animales pequeños y medianos, considera un túnel grande, permitiendo que la luz ingrese al interior del paso de fauna, creando un entorno más natural (**Figura C8. 52**, arriba izquierda). Se muestra también el caso de pasos de fauna con fin exclusivo de conectividad biológica (**Figura C8. 52**, ambos esquemas arriba), otros casos que complementan la conectividad biológica con la conectividad pecuaria y vehicular rural (**Figura C8. 52**, medio izquierda), y con la conectividad hidrológica (**Figura C8. 52**, medio derecha), pasos de fauna diseñados para pequeños mamíferos y organismos pequeños (**Figura C8. 52**, abajo izquierda), y pasos de fauna para anfibios (**Figura C8. 52**, abajo derecha).

Algunos ejemplos de pasos de fauna son los siguientes:

Pasos bajo nivel para mamíferos, exclusivos para fauna: Este tipo de pasos consiguen buena efectividad para el paso de fauna. En este caso se limita el paso de vehículos (**Figura C8. 53**, izquierda). Se muestra otra referencia real en **Figura C8. 53** (derecha), de un paso de fauna que excede los 20 m de largo, con 8 m de ancho de apertura, y 5 m de alto de apertura, dando factores de “apertura relativa” lateral de 2,5 y vertical de 4. De todas maneras, este tipo de estructuras tan amplias no siempre son consideradas positivas respecto a ser costo-efectivas.



Figura C8. 53. Referencia real de un paso bajo nivel específico para fauna, donde la revegetación facilita la integración del paso en su entorno (izquierda); referencia real de un paso de fauna de tipo arco enterrado grande de concreto para fauna terrestre (derecha).

Paso bajo nivel multifunción: Comparten el paso de fauna silvestre y fauna doméstica (ganado), incluso el paso de baja frecuencia de vehículos en zonas rurales. En este caso el sustrato puede ser mixto (natural y grava), por lo que la vegetación no dará una apariencia del todo natural hacia la fauna silvestre, como en los pasos bajo nivel para uso exclusivo de fauna (**Figura C8. 54**).



Figura C8. 54. Referencia real de dos pasos bajo nivel que complementa con conectividad vehicular rural.
Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).

Paso bajo nivel para pequeños vertebrados: Considera pequeños carnívoros, micromamíferos y reptiles, y algunas aves que viven en el suelo (**Figura C8. 55**). Se recomienda dimensiones de 2x2 m, y de longitud lo más mínima posible.



Figura C8. 55. Referencia real pasos bajo nivel para pequeños vertebrados con incorporación de rocas como elementos naturalizantes (izquierda) y ramas secas para facilitar refugio a animales de pequeño tamaño (derecha). Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).

Paso bajo nivel para anfibios (Figura C8. 56): Los anfibios presentan necesidades muy particulares, ya que no poseen la capacidad de orientar sus desplazamientos en búsqueda de acceso a los pasos de fauna. Por esta razón, la efectividad de las estructuras diseñadas para este grupo depende en gran medida de la instalación de un cerramiento específico, que actúa como una estructura de guía para interceptar sus movimientos y dirigirlos hacia los pasos correspondientes, evitando que ingresen a la carretera o camino. Es relevante en este sentido considerar a lo menos guías de color opaco de 40 cm de alto. La instalación de estas estructuras debe localizarse en rutas de migración o movimiento de dichas especies, en torno a acequias, esteros, lagunas, o humedales en general. Las dimensiones se sugieren en torno a un factor desde 20 m de longitud por 1 m² de apertura, hasta 50 m de longitud por 3 m² de apertura.



Figura C8. 56. Referencia real de un paso bajo nivel para anfibios (izquierda); referencia real de estructura opaca de metal que cumple rol de cerramiento perimetral y guía a los anfibios hacia el paso bajo nivel (derecha). Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).

Rejas para guiar hacia pasos de fauna

Descripción

Estas rejas son utilizadas para evitar el acceso de los animales a las carreteras o caminos, y dirigir a la fauna hacia puntos designados donde pueden cruzar la carretera con seguridad. Complementan el buen funcionamiento de las estructuras de pasos de fauna, permiten reducir la mortalidad de fauna por atropello y aumentan la seguridad vial.

Lineamientos de diseño

Es deseable que este tipo de estrategias de diseño contemplen formas curvilíneas (guiando naturalmente a los animales hacia el paso sin causar estrés) y utilizar materiales transparentes o semitransparentes (permitiendo visibilidad y reduciendo la ansiedad en los animales).

Es imprescindible en enrejados perimetrales disponer de estructuras de pasos de fauna, por lo que es importante que los extremos del tramo vallado conduzcan directamente a una de estas estructuras. Al no cumplirse esto, se pueden generar puntos negros de accidentes causados por grandes organismos en los extremos del tramo enrejado (**Figura C8. 57**).

Es posible adaptar algunas secciones del enrejado para evitar que ciertos organismos con capacidad de sortear estas barreras puedan filtrarse a través del enrejado (ver más adelante).

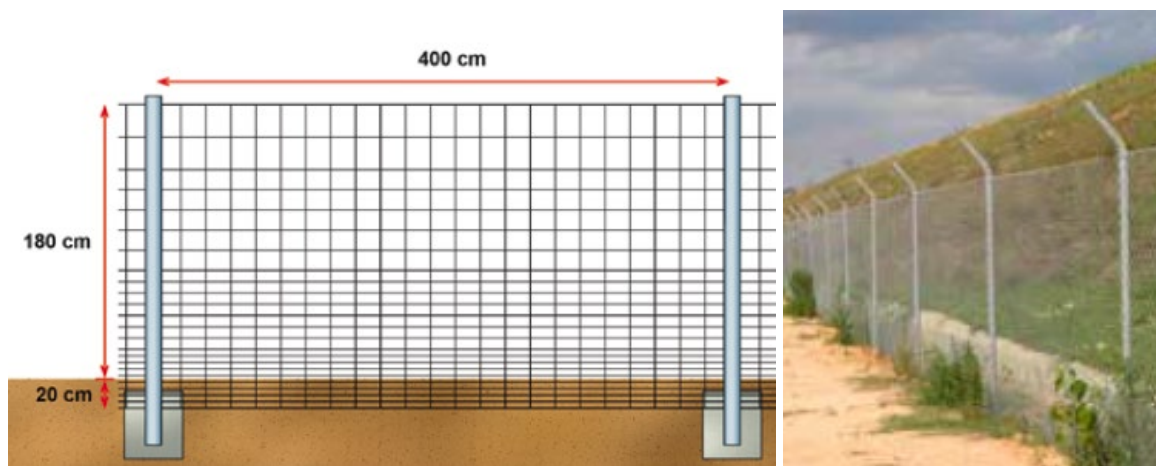


Figura C8. 57. Esquema de un enrejado perimetral conducente a un paso bajo nivel (izquierda); referencia real de enrejado perimetral conducente a un paso bajo nivel (derecha). Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).

Referentes

Algunos ejemplos de rejas adaptadas a diferentes situaciones se enlistan a continuación:

Enrejados perimetrales para grandes mamíferos: El cerramiento se realizará preferiblemente con malla anudada rectangular de alambre galvanizado y de densidad progresiva o con malla de torsión. Los postes de tensión deben ser de acero galvanizado (**Figura C8. 58**), y pueden considerar algunas adaptaciones específicas para cada especie, reduciendo la posibilidad de que algunos animales puedan filtrarse a través del enrejado.



Figura C8. 58. Referencia real de enrejado perimetral con adaptaciones para jabalí, evitando que su actividad de excavación modifique la permeabilidad del enrejado (izquierda); referencia real de enrejado perimetral con adaptaciones para lince ibérico, evitando que al escalar o saltar pueda sortear dicho enrejado (izquierda). Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).

Enrejados perimetrales para pequeños vertebrados: Esta medida propone la adaptación de enrejados perimetrales para fauna, incorporando modificaciones para que pequeños organismos puedan filtrarse a través de la barrera (**Figura C8. 59**).



Figura C8. 59. Referencia real de doble enrejado de diferente ancho para evitar el paso de mamíferos pequeños en su parte más baja (izquierda); esquema de un enrejado con refuerzo tipo visera en ángulo de 45° hacia el exterior (derecha). Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).

Rejas o paneles perimetrales

Descripción

Estructuras que se instalan a lo largo de las carreteras para dirigir a la fauna hacia los pasos de fauna y evitar que crucen por encima de la vía. Complementan el buen funcionamiento de las estructuras de pasos de fauna.

En esta sección se describen distintas medidas destinadas a evitar los choques de aves con carreteras y enrejados perimetrales. Se trata de elementos que se incorporan para aumentar su visibilidad y forzar un cambio de trayectoria de las aves (habitualmente se trata de una elevación de vuelo) evitando así la colisión.

Lineamientos de diseño

Se sugiere que los enrejados perimetrales o pantallas transparentes incorporen marcas de un color que contraste fuertemente con el color del paisaje del entorno, especialmente durante el atardecer y el anochecer, períodos de mayor movilidad de las aves (**Figura C8. 60**).

En territorios de interés para aves, con tonalidades oscuras o tonos café (humedales, estepas, entre otro), las marcas pueden ser de color claro (p. ej. Blanco), aumentando la visibilidad en períodos de crepúsculo. En contextos de paisajes colores verdosos, el color naranja emerge como un buen elemento de contraste.

El ancho de las franjas debe tener anchura mínima de 0,5 cm y separación máxima de 10 cm, utilizando adhesivos sobre paneles, o pintura sobre rejas. También pueden utilizarse adhesivos o pintura ultravioleta, imperceptibles al ojo humano, pero que aves y otros organismos pueden visualizar.

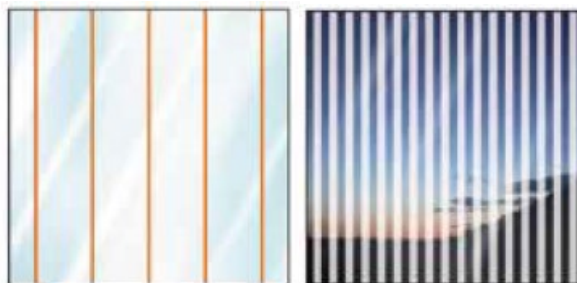


Figura C8. 60. Esquema que muestra distintas opciones de señalización de paneles mediante franjas verticales. Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).

Referentes

A continuación, se muestran algunos ejemplos de enrejados perimetrales con pintura contrastante, y ejemplos de paneles específicos para evitar colisión de murciélagos (**Figura C8. 61**).



Figura C8. 61. Referencia real de enrejado perimetral pintado de color amarillo contrastante (izquierda) y Cerramiento anticolidión para murciélagos de 5 m de altura y malla de simple torsión en una línea de alta velocidad (derecha). Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – España (2015).

8.5 Matriz de resumen

La matriz a continuación resume las soluciones de diseño ecosistémico presentadas de acuerdo a los Objetos de Protección (OP) y sus respectivos Atributos Ecológicos Clave (AEC) que son abordados en cada una. No se incluye el detalle de etapa de la obra ya que las soluciones pueden aplicarse desde la etapa de construcción y permanecer durante la vida útil de la obra, incorporando apropiada mantención

La utilidad de esta herramienta (**Tabla C8. 5**) es que los titulares puedan encontrar de manera rápida algunas soluciones de diseño enfocadas específicamente en los AEC que reciban impactos de las obras MOP y puedan ser tratados de manera temprana y preventiva.

Tabla C8. 5 Matriz de soluciones de diseño ecosistémico y los Atributos Ecológicos Clave (AEC) buscan abordar. Fuente: Elaboración propia.

		Objeto de Protección		Flora y Vegetación		Fauna				Ecosistema		Total	
		Agua	Suelo	Flora y Vegetación	Flora y Vegetación	Peces	Aves	Anfibios y reptiles	Mamíferos	Conectividad hidromorfológica	Conectividad de paisaje		
Categoría de diseño ecosistémico	Atributo Ecológico Clave (AEC)	Calidad del Agua	Cantidad de Agua	Calidad del Suelo	Estructura de la vegetación ribereña	Flora hidrófila	Peces	Aves	Anfibios y reptiles	Mamíferos	Conectividad hidromorfológica	Conectividad de paisaje	Total
	Nombre solución												
Atraviesos	Cajones modificados		●						●	●			3
	Arcos abiertos		●				●		●	●	●	●	6
	Cajones abiertos		●				●		●	●	●	●	6
	Alcantarillas en planicie de inundación		●								●		2
Mejoramiento de cauce	Mejoramiento de la sinuosidad del cauce	●		●							●		3
	Mejoramiento del lecho del cauce	●									●		2
	Uso de árboles y ramas en riberas erosionables	●		●	●	●					●	●	6
	Revestimientos vegetales	●		●	●	●					●	●	6
Pasos de fauna	Pasos bajo nivel en caminos para fauna							●	●	●			3
	Rejas para guiar hacia pasos de fauna								●	●			2
	Rejas o paneles perimetrales para elevar vuelo							●					1
	Dispositivos disuadores de vuelo en cableado							●					1
Total de estrategias por AEC		4	4	3	2	2	2	3	5	5	7	4	