



# Guía de soluciones naturales y basadas en la naturaleza para la estabilización de riberas en Puerto Rico

Mayo de 2024



FEMA

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

**Preparado para:**

FEMA Joint Recovery Office (JRO)  
50 State Road PR-165, 2<sup>nd</sup> Floor, West Wing  
Guaynabo, Puerto Rico

**Preparado por:**

AECOM  
19219 Katy Freeway, Suite 100  
Houston, TX 77094  
aecom.com

**Advertencia:**

Todo el contenido provisto en este documento es solo para fines educativos. FEMA no provee asesoramiento o datos técnicos o de ingeniería profesional a los solicitantes de subvenciones, y ninguna de la información o los ejemplos provistos en este documento se interpretará como tal. Los solicitantes deben desarrollar sus paquetes de solicitud con información, experiencia y datos obtenidos de forma independiente y específicos del proyecto. La información educativa provista en este documento se ofrece de forma general, hipotética y "tal cual", sin garantías de exhaustividad, precisión, utilidad u oportunidad. Al tomar determinaciones de elegibilidad, FEMA considera solicitudes de subvención completas que contienen toda la información requerida, para garantizar que las actividades propuestas cumplan con todos los requisitos estatutarios, reglamentarios y programáticos aplicables.

**Colaboradores:** The Nature Conservancy y Protectores de Cuencas, Inc.

**Agradecimientos:** Ing. Gregory L. Morris, de Gregory L. Morris Engineering-Coop (GLM-Coop).

Agradecemos las contribuciones del Ing. Gregory L. Morris, Ph. D., y GLM Engineering Corp. por brindarnos ayuda y apoyo en los esfuerzos de desarrollo de capacidades de la Oficina de Recuperación Conjunta (JRO, por sus siglas en inglés) de FEMA de Puerto Rico. Su pericia ha contribuido, en gran medida, a mejorar nuestra comprensión de los beneficios de las soluciones naturales para abordar los retos de la estabilización de riberas en Puerto Rico. También extendemos nuestro agradecimiento a Todd Bridges, Ph. D., fundador y exlíder nacional de la Iniciativa de Ingeniería con la Naturaleza (Engineering With Nature) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE, por sus siglas en inglés), y a su equipo, por su trabajo pionero y su compromiso continuo con las prácticas de ingeniería sostenible.



### Información de calidad

Preparado por	Revisado por	Verificado por	Aprobado por
AECOM	AECOM	AECOM	Oficina de Recuperación Conjunta de FEMA
	The Nature Conservancy	The Nature Conservancy	
	Protectores de Cuencas	Protectores de Cuencas	

### Historial de revisiones

Revisión	Fecha de revisión	Detalles	Autorizado	Nombre	Cargo

### Lista de distribución

N.º de copias impresas	PDF requerido	Nombre de la empresa o asociación

## Índice

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos de esta guía.....	1
1.2. Antecedentes de la erosión de las riberas.....	2
1.3. Estado de los canales de Puerto Rico.....	5
1.4. La función de las SNBN en la estabilización de las riberas.....	7
<b>2. Metodologías y diseños conceptuales de las SNBN.....</b>	<b>10</b>
2.1. Manejo de la vegetación ribereña.....	13
2.1.1. Descripción de soluciones y objetivos.....	13
2.1.2. Entornos adecuados para una implementación exitosa.....	14
2.1.3. Materiales y equipos de construcción.....	16
2.1.4. Secciones típicas.....	17
2.1.5. Monitoreo y manejo adaptativo.....	27
2.1.6. Estimaciones de costos.....	27
2.2. Medidas estructurales con vegetación.....	28
2.2.1. Descripción de soluciones y objetivos.....	28
2.2.2. Entornos adecuados para una implementación exitosa.....	29
2.2.3. Materiales y equipos de construcción.....	29
2.2.4. Secciones típicas.....	30
2.2.5. Monitoreo y manejo adaptativo.....	38
2.2.6. Estimaciones de costos.....	38
2.3. Barricadas de troncos diseñados.....	39
2.3.1. Descripción de soluciones y objetivos.....	39
2.3.2. Entornos adecuados para una implementación exitosa.....	40
2.3.3. Materiales y equipos de construcción.....	40
2.3.4. Secciones típicas.....	41
2.3.5. Monitoreo y manejo adaptativo.....	42
2.3.6. Estimaciones de costos.....	42

2.4. Aspectos reglamentarios.....	43
<b>3. Casos de estudio .....</b>	<b>44</b>
3.1. Restauración de Río Loco (Guánica, Puerto Rico) .....	44
3.2. Proyecto de estabilización de las paletas de riberas del río Canóvanas (Canóvanas, Puerto Rico) .....	45
<b>4. Referencias.....</b>	<b>48</b>
4.1. Recursos .....	49
<b>Apéndice.....</b>	<b>54</b>

## Ilustraciones

Ilustración 1-1: Representación esquemática de la sección transversal de un canal fluvial que muestra las zonas hidrológicas, la distribución de la vegetación y los efectos de la variación del nivel del agua en la estabilidad de las riberas .....	3
Ilustración 1-2: Perfil conceptual que muestra la migración del canal de un río o quebrada a través de su valle de inundación a lo largo de los años, a la vez que mantiene la dimensión o capacidad de caudal de su canal. Fuente: DNER, 2016 .....	4
Ilustración 1-3: Muros de concreto de canal trapezoidal fallando a lo largo de la quebrada Buena Vista, entre el complejo de edificios residenciales Jardines Metropolitanos y la comunidad Ramón Nevárez en San Juan. (2023) .....	7
Ilustración 1-4: Ejemplo de ilustración de los tres tipos de SNBN de estabilización de riberas que se analizan en esta guía. Las soluciones pueden funcionar conjuntamente para beneficiar tanto al sistema fluvial natural como a las comunidades .....	10
Ilustración 2-1: Hidrosiembra realizada por Protectores de Cuencas para ayudar a restaurar las riberas del río Loco en Yauco (Crédito de la foto: PDC) .....	14
Ilustración 2-2: Sección típica para el uso de solo vegetación para la estabilización. Adaptado de McCullah y Gray, 2005 .....	18
Ilustración 2-3: Diseño típico para un entutorado vivo, que se instalan en una matriz espaciada uniformemente a lo largo de la ribera para crear una red de raíces. Adaptado de McCullah y Gray, 2005 .....	23
Ilustración 2-4: Sección típica de rollos de fibra de coco con plantaciones y tapones herbáceos. Adaptado de McCullah y Gray, 2005 .....	26
Ilustración 2-5: Sección típica de revestimiento rocoso vegetal. Adaptado de McCullah y Gray, 2005 .....	31
Ilustración 2-6: Sección típica de paletas de roca. Adaptado de McCullah y Gray, 2005 .....	33
Ilustración 2-7: Sección típica de bloques de cemento articulados. La parte superior muestra una vista en sección transversal; la parte inferior es una vista en planta de esa	

sección transversal. Adaptado de McCullah y Gray, 2005 .....	35
Ilustración 2-8: Sección típica de la protección de base de piedras con vegetación. La parte superior muestra una vista en planta; la inferior, una sección transversal. Adaptado de McCullah y Gray, 2005 .....	37
Ilustración 2-9: Sección típica de un ELJ a través de LWB. La parte izquierda muestra la orientación típica en la quebrada en vista en planta, la parte superior derecha muestra una configuración ampliada de los LWD y la parte inferior muestra una vista en sección transversal. Adaptado de McCullah y Gray, 2005 .....	41
Ilustración 3-1: Hidrosiembra en las riberas del canal río Loco .....	44
Ilustración 3-2: Ubicaciones de eliminación de escombros a lo largo de río Loco .....	45
Ilustración 3-3: La alternativa elegida para la estabilización del río Canóvanas, cuyo diseño involucra la construcción de un banco y paletas de roca, y la reubicación del canal <i>thalweg</i> .....	47

## Tablas

Tabla 2-1: Análisis comparativo de metodologías de SNBN para la estabilización de riberas .....	12
Tabla 2-2: Plantas clasificadas por zona de ribera, hábito, condición de humedal y sus aplicaciones para la estabilización de riberas. Para una definición detallada de cada hábito vegetal y condición de humedal, véase el apéndice de este documento .....	19
Tabla 2-3: Especies de plantas nativas de Puerto Rico clasificadas por zona, mejores usos, usos en soluciones basadas en la naturaleza y requisitos de mantenimiento y funcionamiento. Adaptado de Urban Hydraulics, 2024 .....	21
Tabla 2-4: Especies de árboles y arbustos que pueden crecer de estacas o postes vivos .....	24
Tabla 2-5: Estimaciones de costos para medidas SNBN .....	27
Tabla 2-6: Estimaciones de costos para las medidas estructurales con vegetación .....	38
Tabla 2-7: Estimaciones de costos para barricadas de troncos .....	43

# 1. Introducción

Esta guía está diseñada para facilitar a FEMA y a las partes interesadas el conocimiento necesario junto con consejos prácticos, a fin de que puedan llevar a cabo con éxito los trabajos de estabilización de riberas en Puerto Rico mediante la aplicación de Soluciones Naturales y Basadas en la Naturaleza (SNBN). Esto involucra las tareas de restaurar, proteger y mejorar las zonas de amortiguamiento ribereñas al igual que la vegetación a lo largo de las quebradas en Puerto Rico, especialmente aquellos con pérdidas repetitivas, en consonancia con los objetivos estratégicos de FEMA para mejorar la resiliencia climática.

Los ríos y quebradas proporcionan muchos servicios de ecosistema críticos a la población de la isla. Algunos de los más notables de esos servicios están relacionados con el transporte de aguas de inundación y el suministro público de agua. Sin embargo, los ecosistemas fluviales y quebradas en Puerto Rico se han visto afectados por el desarrollo urbano, la agricultura y otras actividades de modificación de la tierra. Consecuentemente, la urgencia de las prácticas de manejo de riberas sostenibles y resilientes es evidente. El aumento y la evolución de los retos asociados al cambio climático hacen que este objetivo sea más necesario que nunca.

## 1.1. Objetivos de esta guía

- Aumentar la comprensión y el conocimiento sobre las SNBN y su papel en la estabilización de las riberas y la reducción del riesgo de desastres.
- Ilustrar los beneficios y la eficacia de las SNBN en la mitigación de la erosión de las riberas, la protección contra los desastres naturales; y fortalecer la resiliencia de las comunidades ante tales eventos.
- Proveer una guía técnica sobre la implementación de las SNBN para la estabilización de las riberas.
- Facilitar la toma de decisiones informadas al seleccionar las SNBN en diversos contextos fluviales, de tal manera que puedan cualificar para fondos relacionados con la mitigación de FEMA, especialmente en áreas con pérdidas repetitivas.
- Alinear los esfuerzos de estabilización de riberas con los objetivos estratégicos de FEMA, específicamente aquellos dirigidos a disminuir los riesgos ante desastres naturales a través de prácticas de infraestructuras sostenibles y resilientes.

**Esta guía no cubre el análisis hidráulico detallado requerido para diseñar proyectos de estabilización.** Dichos análisis son cruciales y deben ser realizados por profesionales cualificados para garantizar la sostenibilidad y la eficacia de cualquier intervención propuesta. Estos análisis tienen en cuenta los contextos hidrológicos y geomorfológicos más amplios del sistema fluvial, que son fundamentales para comprender la dinámica en juego antes de iniciar cualquier esfuerzo de estabilización. **Sin una evaluación exhaustiva de las secciones transversales y los patrones del río, considerando las metas abarcadoras de restauración, los esfuerzos de estabilización pueden conducir a resultados ineficaces e insostenibles.**

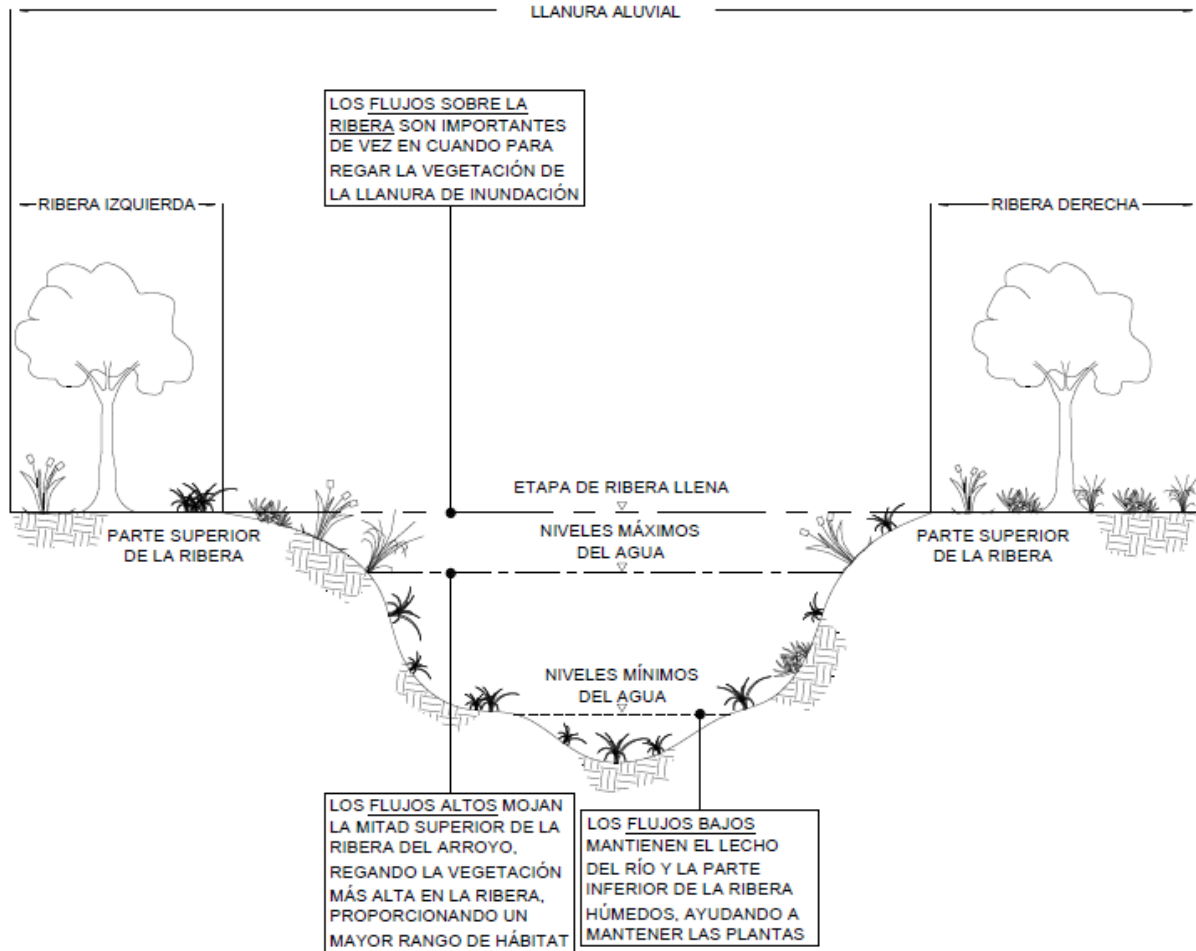


## 1.2. Antecedentes de la erosión de las riberas

El tamaño, la forma y el caudal de las quebradas están directamente relacionados a la zona que drenan, lo que incluye el uso del suelo, la geología y los tipos de suelo resultantes, la topografía y el clima de su cuenca. La combinación de estos factores define los procesos naturales que conducen a la erosión, el transporte del suelo y la clasificación y deposición de materiales aluviales y de otro tipo por los caudales de quebradas y ríos.

La descarga hasta el límite de desbordamiento de un río es el grado o nivel en el que una quebrada o río estable alcanza la parte superior de sus riberas, y cualquier aumento adicional provoca que el agua se derrame sobre el valle de inundación. Se ha demostrado que el nivel del límite de desbordamiento está estrechamente relacionado con la descarga efectiva de un canal y representa el nivel del caudal por el que pasa la mayor parte de la carga anual de sedimentos a lo largo del tiempo. Como tal, es la descarga o caudal del río lo que forma y mantiene la forma del canal. El término **niveles máximos de agua** (AHW, por sus siglas en inglés) hace referencia a la posición promedio de la marca de marea alta durante un período prolongado. También conocida como “niveles ordinarios de agua”, representa el límite entre los medios acuático y terrestre en la legislación federal, en virtud de la Ley de Agua Limpia de EE. UU. (US Clean Water Act). Los **niveles mínimos de agua** (ALW, por sus siglas en inglés) es la contraparte de la AHW. Estos marcan la posición promedio de la marca de marea baja a lo largo de un período prolongado, correspondiente a la elevación donde la superficie del agua se encuentra en su nivel promedio más bajo, a menudo visible como una línea distintiva en la ribera. En la Ilustración 1-1, se muestran los niveles de límite de desbordamiento de AHW y ALW.

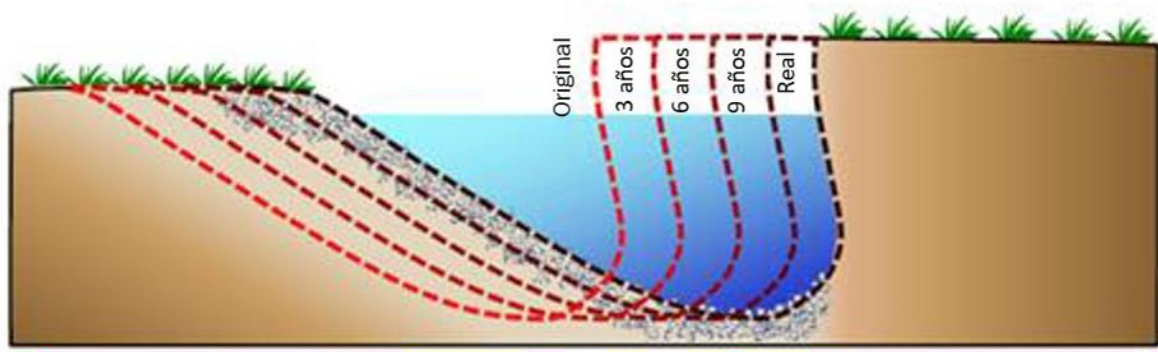
## ESQUEMA DEL CANAL



**Ilustración 1-1: Representación esquemática de la sección transversal de un canal fluvial que muestra las zonas hidrológicas, la distribución de la vegetación y los efectos de la variación del nivel del agua en la estabilidad de las riberas.**

Las quebradas naturales tienen secuencias de rápidos, charcas y escalones que mantienen la pendiente y la estabilidad del canal. Los **rápidos** son elementos del lecho de la quebrada formados por grava o partículas de roca de mayor tamaño, donde la profundidad del agua es relativamente baja y la pendiente es mayor que la pendiente media del canal. Las **charcas** se ubican en las curvas exteriores de los meandros y en las curvas entre rápidos, y son mucho más profundas que la profundidad media de la quebrada. Con caudales bajos, las charcas son elementos de deposición y los rápidos son elementos de abrasión. Sin embargo, con caudales elevados, las charcas sufren abrasión y el material del lecho se deposita en los rápidos. El interior del meandro o curva es un rasgo deposicional llamado varilla semicircular que también ayuda a mantener la forma del canal. Los **escalones** son caídas verticales compuestas a menudo de grandes rocas, lecho rocoso expuesto y árboles caídos. En la parte inferior de cada escalón también hay charcas profundas. El escalón sirve para controlar la nivelación y el estanque disipa la energía. La distancia entre los escalones se acorta a medida que aumenta la pendiente del canal.

Las quebradas naturales rara vez son rectas. Suelen seguir una trayectoria sinuosa y formar curvas o meandros en su camino a través del panorama; estos meandros suelen aumentar a medida que disminuye la pendiente del canal de la quebrada a través de valles y llanuras costeras. Aunque el canal de un río sea “estable”, ello no implica que el río no se mueva lateralmente dentro de su valle de inundación, sino que la sección y el perfil de la profundidad y anchura de su canal permanecen básicamente constantes (Ilustración 1-2). Las quebradas naturalmente estables deben ser capaces de transportar materiales sedimentarios, como arena, sedimentos, arcilla, detritos, así como cantos rodados y grava suministrados por la cuenca. La erosión en la curva exterior del meandro se compensa con la deposición de sedimentos en la varilla semicircular ubicada en el interior del meandro. La velocidad de migración lateral del canal depende de la frecuencia de las grandes inundaciones y de la resistencia proporcionada por la ribera. El sistema de raíces de los árboles, arbustos y otros tipos de vegetación contribuye a fortalecer la ribera contra la abrasión al retener el suelo en su sistema entrelazado de raíces (Ilustración 1-2).



**Ilustración 1-2: Perfil conceptual que muestra la migración del canal de un río o quebrada a través de su valle de inundación a lo largo de los años, a la vez que mantiene la dimensión o capacidad de caudal de su canal. Fuente: DNER, 2016.<sup>1</sup>**

La inestabilidad de las riberas se produce cuando la abrasión hace que el lecho y las paredes del canal se erosionen (degraden) o cuando una deposición excesiva hace que el lecho del canal se eleve (agrave). Este proceso puede producirse de forma natural y provisional debido a episodios de lluvia importantes, luego de los cuales el canal alcanza un nuevo equilibrio. La erosión de las riberas

<sup>1</sup> Departamento de Recursos Naturales y Ambientales [DRNA]. (2016). Guía para mantener la conectividad ecológica en las estructuras de cruce en ríos y quebradas de Puerto Rico.

contribuye al aumento en la vulnerabilidad de las comunidades adyacentes a inundaciones, ya que la erosión de las riberas puede provocar el ensanchamiento o la migración de los canales fluviales y reducir su capacidad. El deterioro de los sedimentos puede convertirse en un problema crítico si el exceso de materiales erosionados procedentes de elevaciones superiores se acumula en los lechos fluviales, lo que altera la dinámica de los caudales y los hábitats. Además, la elevada tensión de cizallamiento y la velocidad del caudal durante las tormentas pueden despojar de vegetación a las riberas de los ríos, exacerbando el desplazamiento de los sedimentos. La falta de hábitat y la desconexión con la llanura aluvial perjudican aún más las funciones ecológicas de la quebrada.

Sin embargo, las actividades humanas también pueden causar o agravar la erosión de las riberas con efectos crónicos o duraderos. La extracción o explotación minera de materiales del cauce del río baja sus niveles. Esto provoca y acelera la incisión del canal y la erosión de las riberas, así como reduce la arena que, de otro modo, nutriría las zonas río abajo y las playas. Las actividades agrícolas que involucran labranza o pastoreo intensivo cerca de las riberas pueden debilitar el suelo y hacerlo más propenso a que el agua se lo lleve. El desarrollo urbano también facilita la sedimentación de los lechos de las quebradas debido a la eliminación de la vegetación y al movimiento de tierras durante las actividades de construcción, lo que permite que el suelo expuesto sea fácilmente transportado por las escorrentías.

Sin embargo, una vez finalizada la fase de construcción, ocurre todo lo contrario. La escorrentía no puede acceder a las partículas del suelo enterradas bajo las superficies pavimentadas ni transportarlas y, como resultado, las aguas pluviales alcanzan a las quebradas y los ríos no solo más rápido, sino también con una mayor capacidad para sacar y transportar materiales blandos y sueltos del lecho del río y de las paredes de su canal, lo que podría provocar la abrasión.

Paradójicamente, los caudales de los ríos disminuyen entre episodios de lluvia luego de la urbanización. Las superficies pavimentadas actúan como barreras que aíslan el suelo, lo que impide la infiltración del agua de lluvia que, de otro modo, se habría descargado gradualmente del suelo y en las quebradas días después, un proceso que es fundamental para mantener los caudales bases. Los embalses que se han construido dentro del cauce para obstruir los flujos fluviales y almacenar agua también atrapan los sedimentos transportados desde zonas situadas río arriba dentro de la cuenca. Esto hace que el río se atrinchiere inmediatamente río abajo y provoque una abrasión significativa de su lecho y de las paredes del canal.

### **1.3. Estado de los canales de Puerto Rico**

La cordillera central de Puerto Rico presenta altos grados de pendiente hacia el sur y el este, mientras que en el norte están muy erosionadas y presentan numerosos valles fluviales. La pendiente sur tiende a estar seca gran parte del año debido al efecto orográfico o de sombra de lluvia provocado por la topografía de la isla y los vientos alisios. Durante lluvias extraordinarias, las quebradas y los ríos de la costa sur tienden a reaccionar más rápido que los del norte; esto hace que crezcan y se conviertan en fuertes torrentes capaces de inundar zonas extensas. La mayor parte de los ríos en el norte no son mayores en volumen y longitud, ya que tienen cuencas de drenaje más grandes. Las pendientes de los canales son empinadas, los valles de los riachuelos tienden a ser estrechos con una buena incisión y las grandes tormentas suelen ser intensas pero breves. Las inundaciones suelen producirse rápidamente luego de lluvias importantes, con descargas máximas de varios órdenes de magnitud por encima de la descarga base, pero las aguas de inundación retroceden rápidamente. La diversa topografía de la isla, unida a sus variados entornos geológicos y regímenes de precipitación, definen la dinámica de las riberas. Esto hace que algunas zonas sean más susceptibles a una rápida pérdida de suelo, cambios en la configuración de los canales y desbordamientos.

La erosión de las riberas representa un importante reto geomorfológico en Puerto Rico, con implicaciones directas para el manejo de las inundaciones, la calidad del agua y el suministro público y la estabilidad ecológica. La mayoría de las quebradas y los ríos de la isla han experimentado alteraciones significativas debido a cambios históricos en el uso de la tierra a lo largo de sus cursos y sus cuencas. Estos han sido afectados por modificaciones directas (por ejemplo, canalización) e indirectas (por ejemplo, deforestación de cuencas) causadas por el hombre, inicialmente relacionadas con actividades agrícolas intensivas, y posteriormente con el desarrollo urbano.

Muchas llanuras aluviales y riberas se han rellenado para dar paso a la construcción de viviendas y otras estructuras urbanas, lo que implica la invasión de los ríos y la restricción de sus caudales, así como la modificación significativa de las condiciones que mantienen la estabilidad de los canales fluviales. En respuesta, en toda la isla se han adoptado diversas medidas provisionales y de infraestructuras grises para compensar estas modificaciones y sus consiguientes efectos en las riberas. Sin embargo, en muchos casos, estas prácticas han agravado los problemas de erosión y abrasión río abajo, además de degradar o destruir los atributos naturales de los segmentos de las quebradas donde se han construido las medidas. Entre algunas de estas prácticas se incluyen las siguientes:

- **“Limpieza de ríos”:** según la Ley Núm. 49 de 2003 de Puerto Rico, según emendada, las actividades de limpieza de ríos deben limitarse a retirar material ajeno al cauce sin alterar su configuración natural. Sin embargo, las actividades a menudo se extienden a la eliminación de toda la vegetación dentro del canal. Esto deja el suelo completamente expuesto, ya que se excavan varillas del lecho del río, se llenan charcas de sedimentos y se enderezan meandros para canalizarlos efectivamente. Este enfoque no solo altera el valle de inundación, sino que también provoca una erosión excesiva y el ensanchamiento de la sección del río. Esto aumenta la deposición de sedimentos en el cauce inmediato y en los segmentos río abajo, lo que potencialmente podría requerir la eliminación repetida de sedimentos del propio canal.
- **Gaviones:** estas cestas de malla metálica rellenas de piedras, diseñadas originalmente para la estabilización de pendientes empinadas, se utilizan con frecuencia para controlar la abrasión de las riberas. Sin embargo, suelen fallar con el tiempo debido a la susceptibilidad de la malla metálica a la corrosión, la abrasión y el impacto de las fuerzas hidráulicas durante las inundaciones, que destruyen o desplazan los gaviones de su posición o ubicación, y así provocan nuevos cambios en el perfil de la quebrada.
- **Blindaje duro tradicional:** esta práctica involucra colocar grandes rocas adjuntas entre sí con cemento Portland, construir fondos de hormigón y muros verticales o instalar láminas de acero piloteadas a lo largo de las riberas para evitar la erosión o, incluso, cerrar completamente el arroyo con tuberías enterradas, lo cual crea, en muchos casos, un embudo o canal impermeable. Aunque resultan eficaces como método a corto plazo para gestionar los picos de caudal, estas prácticas alteran la dinámica natural de los ríos y sus hábitats debido a que inhiben la migración natural de los ríos y los aíslan del valle de inundación circundante. Su falta de rugosidad hace que los caudales sean más rápidos, lo que provoca una grave erosión y abrasión inmediatamente río abajo, que a su vez conduce a la sedimentación río abajo. Además, el segmento de quebrada alterado y acorazado suele requerir un mantenimiento regular porque tenderá a acumular sedimentos debido a la falta de caudales fuertes y frecuentes que, de otro modo, arrastrarían los materiales río abajo; en algunos casos, las alcantarillas pueden quedar completamente bloqueadas por los sedimentos. Además, estos muros pueden fallar y caer en el canal de la quebrada, lo que provoca efectos repentinos y catastróficos: si el muro cae, puede obstruir el caudal o hacer que los paneles adyacentes río abajo de la sección amurallada se socaven y se desprendan, lo que deja la pendiente restante y la superficie del suelo expuestas a una abrasión severa. Un ejemplo de esto se muestra en la Ilustración 1-3.



**Ilustración 1-3: Fallo de muros de concreto de canal trapezoidal a lo largo de la quebrada Buena Vista, entre el complejo de edificios residenciales Jardines Metropolitanos y la comunidad Ramón Nevárez en San Juan. (2023).**

Estas medidas de infraestructura gris, especialmente las que aíslan el canal de una quebrada de su llanura aluvial y del panorama circundante, dificultan gravemente o eliminan las funciones y valores que proporcionan estos sistemas naturales. Estos pueden ser: la reducción y disipación de las velocidades de las aguas de inundación, el sostén de los caudales para el suministro público de agua —incluso el necesario para mantener el hábitat de los peces y la fauna silvestre y los corredores de vida silvestre asociados—, las actividades recreativas al aire libre y la reducción de las temperaturas ambientales cercanas. Mantener o mejorar estos servicios ecológicos es más vital que nunca para salvaguardar el bienestar de las comunidades, especialmente frente a los crecientes impactos asociados al cambio climático. Estos incluyen, entre otros, eventos de lluvia muy intensos o extremos con importantes periodos secos o sequías intermedias, agravados por una reducción de entre el 13% y el 22% de la precipitación media anual para toda la isla en el año 2050 en comparación con la registrada en el periodo comprendido entre 1986 y 2005.

#### **1.4. La función de las SNBN en la estabilización de las riberas**

Las SNBN de las riberas o medidas de bioingeniería se fundamentan en procesos naturales que combinan principios estructurales, biológicos y ecológicos para construir estructuras vivas para la estabilización de pendientes, la reducción de la erosión del suelo, la revegetación y el control de inundaciones. Esta guía se enfoca en proveer la información necesaria para que las técnicas de estabilización de las SNBN para riberas puedan implementarse dentro de las dimensiones establecidas del canal y así ayudar a mantener un nivel equilibrado de erosión de las riberas y deposición de sedimentos. Es decir, mantener el proceso de erosión a lo largo de las riberas que se espera que esté en equilibrio con la hidrología de la quebrada para un determinado tipo de canal.

Esto implica reconocer la interacción dinámica entre los niveles hidrológicos (p. ej., límite de desbordamiento, AHW y ALW) y las características geomórficas de las riberas que dictan la resistencia a la erosión y la necesidad de SNBN adaptadas en las estrategias de estabilización de las riberas. De este modo, las posibilidades de que se produzcan alteraciones repentinas en las dimensiones del canal pueden reducirse de forma significativa dentro de un área relativamente limitada de sus llanuras aluviales; esto refuerza también la capacidad de las riberas y de los cauces para resistir todos los efectos erosivos de las fuerzas hidráulicas, de abrasión, de desgaste y de disolución.

El principio fundamental empleado aquí es el Diseño de Canales Naturales (NCD, por sus siglas en inglés). El mismo está dirigido a restaurar la dimensión, el patrón y el perfil de los sistemas fluviales alterados mediante la emulación de las quebradas naturales estables. Entender los procesos de erosión, transporte y deposición de sedimentos impulsados por las acciones hidrológicas es esencial para diseñar intervenciones eficaces y sostenibles. Los principios de la estabilización de riberas incluyen el diseño basado en procesos que apoyan su adaptación a los cambios evolutivos del río a lo largo del tiempo. Es esencial diseñar intervenciones que se adapten a estos sistemas dinámicos en contextos tanto espaciales como provisionales. Además, mantener o restablecer el equilibrio en la descarga de agua y el transporte de sedimentos reduce la necesidad de estructuras duras extensas y es crucial para prevenir la rotura de las riberas.

Otro principio clave es la geometría estable de las riberas, que consiste fundamentalmente en darles forma para que resistan la erosión de manera natural y soporten las fuerzas del agua que fluye, lo que reduce la necesidad de un blindaje rígido y fomenta los enfoques de la bioingeniería. Por ejemplo, cuando el diseño del proyecto incorpora plantas nativas sus raíces refuerzan aún más el suelo, absorben el agua y reducen la escorrentía. Estas plantaciones pueden adoptar la forma de árboles y arbustos de raíces profundas que mantienen el suelo en su sitio y hierbas que forman densas alfombras para proteger la superficie del suelo. Juntos, crean una armadura viva que es flexible y responde a los cambios en los niveles de agua y las condiciones de caudal. En esencia, este enfoque reconoce que una ribera bien diseñada proporciona apoyo a un ecosistema autosostenible que no solo provee control de la erosión, sino también una mejor calidad del agua para el suministro público y la recreación, así como también hábitat para una variedad de especies acuáticas y terrestres.

Muchos proyectos de estabilización de ríos fracasan porque se limitan a tratar los síntomas específicos de cada ubicación sin comprender las causas más generales de la erosión y degradación de los canales y riberas. El éxito a largo plazo de la estabilización de las riberas debe reconocer la naturaleza interconectada de los procesos hidrológicos y geomórficos en toda la cuenca de drenaje de un río. Estrategias como la planificación sostenible del uso del suelo y el manejo integral de las cuencas hidrográficas son fundamentales para lograr la resiliencia ecológica y comunitaria a largo plazo, incluso la de los flujos de aguas superficiales y sus cauces. Aunque se reconoce que los principios y beneficios de las intervenciones a gran escala, como el manejo integral de llanuras aluviales, son esenciales para la salud de las vías fluviales y la protección de las comunidades adyacentes, es importante señalar que están fuera del alcance de esta guía.<sup>2</sup>

La medida más rentable y eficaz para hacer frente a la erosión de las riberas es prevenir las actividades que provocan modificaciones significativas de los canales y evitar o descartar las infraestructuras no relacionadas con el agua (viviendas, edificios, carreteras, etc.) en las zonas

---

<sup>2</sup> Para obtener información sobre las SNBN específicas que pueden ayudar a abordar la escorrentía de aguas pluviales en las zonas urbanas de Puerto Rico, revise la Guía de la Oficina de Recuperación Conjunta de FEMA de Puerto Rico sobre las SNBN para el manejo de aguas pluviales.

expuestas a los efectos de los picos de caudal o en donde cabe esperar cambios naturales en la configuración de los canales y las riberas.

Las estrategias, intervenciones y soluciones descritas en esta guía emplean procesos naturales para asistir en mantener un nivel equilibrado de erosión de las riberas y deposición de sedimentos. Estas estrategias deben emplearse luego de restaurar la dimensión, el patrón y el perfil del canal para que coincidan con la hidrología de la cuenca y la morfología del valle, utilizando tanto el análisis NCD como el análisis basado en procesos y métodos de diseño. La mayoría de los diseños de proyectos de estabilización de riberas fracasan porque no hubo un análisis geomórfico fluvial inicial ni una evaluación analítica de la estabilidad del canal ni una evaluación hidráulica del cizallamiento, la velocidad o, en algunos casos, la flotabilidad para comparar con los umbrales críticos de estabilidad publicados de los tratamientos de las riberas. En el caso de los tratamientos de ribera es crucial para su resistencia tener la certeza de que, como mínimo, la sección transversal del límite de desbordamiento está presente o se ha restaurado antes de elegir soluciones de ribera.

Las SNBN aprovechan los procesos y materiales naturales, y a veces las medidas estructurales, para hacer frente a los retos medioambientales. Esto fomenta la recuperación de los ecosistemas y aumenta la resiliencia de las comunidades al integrar la funcionalidad ecológica con las estrategias de manejo de inundaciones. En el contexto de la estabilización de riberas, las SNBN incluyen la restauración de la vegetación natural y la construcción de barreras estructurales vivas para reducir la erosión y mejorar el hábitat, lo que contribuye a la salud general de la cuenca (véase la Ilustración 1-4).

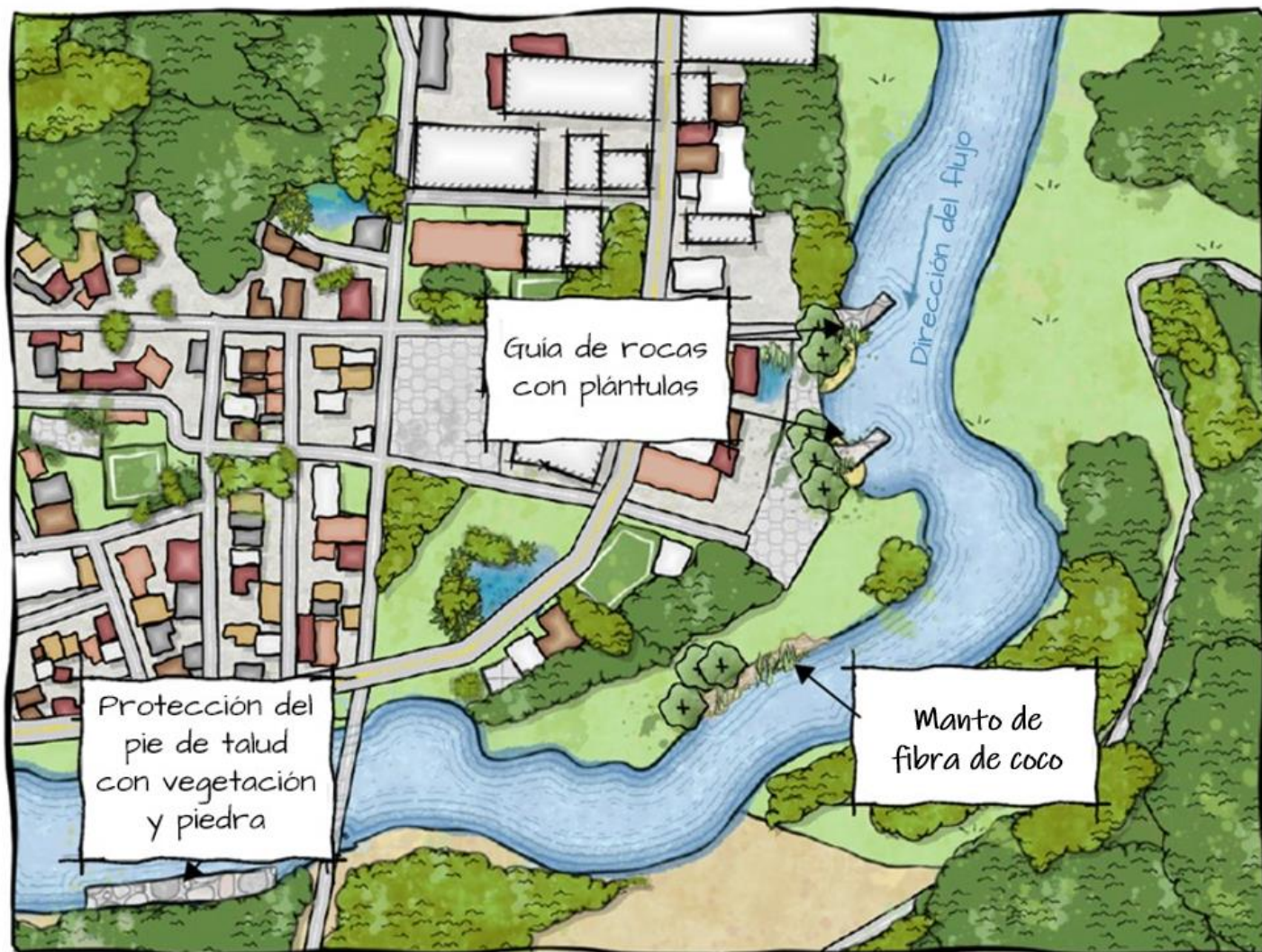
La función de las SNBN en Puerto Rico es fundamental dada la diversidad ecológica y las formaciones geográficas únicas de la isla, así como la necesidad de soluciones que acomoden tanto la resiliencia comunitaria como la ambiental. Mediante la integración de la vegetación nativa a través de prácticas de bioingeniería, la creación o restauración de zonas de amortiguación ribereñas y el empleo de técnicas basadas en la NCD, las SNBN trabajan para estabilizar las riberas, reducir las tasas de erosión y mejorar la calidad del agua.

La participación y la educación de la comunidad son imprescindibles para garantizar que los proyectos de restauración sean culturalmente pertinentes y cuenten con el apoyo de las partes interesadas locales. Este enfoque fomenta la conexión y el sentido de pertenencia entre las comunidades y su entorno natural mediante la promoción de prácticas de administración y manejo sostenible de la tierra que pueden reducir el impacto de la erosión de las riberas a largo plazo.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> La implementación de las SNBN para la estabilización de riberas en Puerto Rico también involucrará, en última instancia, la promoción de las mejores prácticas de control de la erosión y la integración de la vegetación y la recuperación del suelo para garantizar la sostenibilidad de las intervenciones. Estas prácticas incluyen la promoción de los esfuerzos de remediación del suelo, como el compostaje y el uso de mantillo, en particular en las zonas altas con suelo desnudo que requieren vegetación y cobertura forestal. La aplicación de las mejores prácticas de control de la erosión entre los agricultores y otros propietarios de tierras, especialmente en pendientes pronunciadas y zonas propensas a la erosión, es necesaria para reducir el disturbio del suelo y las escorrentías de sedimentos. El uso de herbicidas en esas zonas debe limitarse para preservar las estructuras radiculares existentes que estabilizan el suelo.





**Ilustración 1-4: Ejemplo de ilustración de los tres tipos de SNBN de estabilización de riberas que se analizan en esta guía. Las soluciones pueden funcionar conjuntamente para beneficiar tanto al sistema fluvial natural como a las comunidades.**

## 2. Metodologías y diseños conceptuales de las SNBN

Las SNBN de las riberas pueden dividirse en dos enfoques generales: el manejo de la vegetación ribereña (también conocido como medidas de bioingeniería basadas en plantas) y las medidas estructurales con vegetación (también conocidas como bioingeniería basada en estructuras). Estos enfoques se dividen en base a la función prevista, el tipo de material y la capacidad de cambiar de forma dinámica con el tiempo. Como su nombre indica, la bioingeniería vegetal utiliza plantas ribereñas para proporcionar estabilidad y resistencia a largo plazo a las riberas mediante el uso de sistemas radiculares que aglutinan las partículas del suelo y le confieren cohesión y resistencia a la erosión. Este tipo de tratamiento es flexible y dinámico y puede utilizarse en ubicaciones que no requieran una protección estática de la línea de ribera cuando se prevea la erosión de la ribera durante caudales elevados. La selección de la vegetación adecuada para las diferentes zonas

hidrológicas es clave para la estabilización de las riberas, desde especies tolerantes a la sequía en la ribera superior hasta especies vegetales de humedal en las zonas más bajas. También es muy importante mantener la viabilidad de la vegetación frente a caudales de agua variables e impactos extremos del clima, sobre todo hasta que se establezcan plenamente luego de la plantación. Como ejemplos de tratamientos basados en plantas cabe citar la recalificación y la hidrosiembra, las zanjas de maleza, la reforestación y los materiales vegetales vivos.

Las actividades de mantenimiento —para controlar el crecimiento de enredaderas para que no estrangulen la vegetación que se haya plantado, especialmente la vegetación leñosa— son esenciales hasta que estas puedan desarrollar un dosel suficiente para suprimir el crecimiento de las plantas trepadoras. Las actividades de mantenimiento también incluyen el control de las especies invasoras que podrían suprimir el crecimiento de la vegetación nativa. Sin embargo, las medidas de control no deben centrarse exclusivamente en la eliminación de todas las especies de plantas exóticas o introducidas, sino en el manejo de estas en función de su beneficio potencial para el proyecto. El tulipán africano (*Spathodea campanulata*), el ébano de oriente (*Albizia lebbek*) y la *albizia procera*, por ejemplo, son especies arbóreas introducidas que se han extendido por toda la isla debido a su rápido crecimiento y a su capacidad para colonizar suelos muy alterados. Estas especies se han comportado como especies pioneras al fomentar la producción de hojarasca, que a su vez aumenta el contenido orgánico y la humedad de la capa superior del suelo, lo que apoya los procesos de sucesión que benefician el establecimiento de la flora nativa. Por lo tanto, la identificación y eliminación cuidadosa de las especies vegetales introducidas indeseables debe llevarse a cabo de modo que dicha acción no elimine los beneficios potenciales de permitir las, al menos inicialmente, en la ubicación del proyecto.

La bioingeniería estructural utiliza materiales estructurales, como rocas nativas *in situ*, revestimiento rocoso, troncos, productos fabricados o material inerte para la estabilización de canales. Este tipo de tratamiento está diseñado para crear riberas casi estáticas que permanezcan estables bajo flujos de agua de alta velocidad o inundaciones constantes. Este tratamiento se utiliza en canales fluviales y pendientes de ribera expuestos a la abrasión que requieren algo más que vegetación para soportar las fuerzas hidrodinámicas de los caudales elevados y las cargas de sedimentos. Para tratar las riberas erosionadas que deben permanecer estáticas y las ubicaciones de alto riesgo donde el movimiento de las riberas es inaceptable (por ejemplo, adyacentes a puentes, autopistas o corredores urbanos) se requieren enfoques adicionales de ingeniería y diseño basados en estructuras. La bioingeniería estructural puede combinarse con tratamientos vegetales para aumentar la resistencia a la erosión. Sin embargo, es importante elegir especies vegetales que se establezcan rápidamente y que sean lo suficientemente robustas como para sobrevivir a caudales elevados. Algunos ejemplos de tratamientos estructurales son el revestimiento rocoso con cobertura de tierra, la protección *in situ* del pie de la ribera con revestimiento rocoso y de los cantos rodados, el revestimiento rocoso con vegetación, cantos rodados, la plantación conjunta, barricadas de troncos artificiales y los revestimientos de raíces o de árboles.

El manejo de la sedimentación es crucial para cualquiera de los dos diseños de las SNBN, ya que una deposición excesiva de sedimentos puede provocar la formación de varillas en el canal que obstruyan los flujos de agua y, así, aumentar el riesgo de inundaciones. La sedimentación excesiva también puede provocar la concentración de caudales a lo largo de una sección limitada del canal, lo que ocasiona posibles abrasiones, lo que se traduce en la degradación de los hábitats fluviales.

En esta sección se describen las SNBN para la estabilización de riberas, desde el establecimiento de zonas de amortiguación ribereñas robustas hasta la integración de medidas estructurales con crecimiento vegetativo. Cada método se presenta con sus condiciones aplicables, materiales de construcción, secciones típicas y estimaciones de costos. La planificación para la implementación de estos métodos debe tener como objetivo estratégico la época de sequía y fuera de la temporada de huracanes, cuando las condiciones son más estables y el riesgo de erosión inmediata o de daños

por tormentas se reduce de forma significativa. A continuación, se describe la idoneidad de los entornos para cada método de SNBN, tomando en cuenta factores como la pendiente, la hidrología y las necesidades de hábitat de la vegetación requerida. La Tabla 2-1 resume las capacidades y limitaciones de cada método y provee una referencia rápida para su aplicación adecuada en los esfuerzos de estabilización de riberas. Cada método se evalúa por medio de varios aspectos, lo que incluye la idoneidad para aplicaciones en riberas, puntas y dentro de la quebrada; la frecuencia de inundación permisible; las velocidades de caudal; y si el enfoque es no estructural o híbrido.

**Tabla 2-1: Análisis comparativo de metodologías de SNBN para la estabilización de riberas**

Categoría	Método	Ribera	Punta	Dentro de la quebrada	Frecuencia de inundación permisible	Velocidad de caudal	Estructura
Manejo de la vegetación ribereña	Solo vegetación	✓	✓	✓	Varía	Más baja	✓
	Estaca viva	✓	✓		Moderada	Baja	✓
	Mantos de fibra de coco	✓	✓		Alta	Baja	✓
Medidas estructurales con vegetación	Revestimiento rocoso con plantas		✓	✓	Alta	Moderada-alta	Híbrida
	Guía de roca con plantas		✓	✓	Alta	Moderada-alta	Híbrida
	Bloques de cemento articulados con vegetación	✓	✓		Alta	Moderada-alta	Híbrida
Barricadas de troncos	Protección longitudinal de piedras vegetales		✓		Alta	Moderada-alta	Híbrida
	Barricadas de troncos		✓	✓	Alta	Moderada-alta	Híbrida

## 2.1. Manejo de la vegetación ribereña

### 2.1.1. Descripción de soluciones y objetivos

La bioingeniería mediante el manejo de la vegetación ribereña en Puerto Rico pretende aprovechar la resistencia natural de las especies vegetales nativas a las tensiones hidráulicas y su capacidad para establecer sistemas radicales robustos que anclen los sedimentos. El objetivo principal es estabilizar las riberas y sus bases con una intervención mínima, mediante la creación de un amortiguador ribereño que reduzca la erosión y mejore al mismo tiempo la integridad ecológica y la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos. Este enfoque involucra la selección estratégica y la colocación de vegetación para proporcionar un refuerzo natural a las riberas y crear hábitats para la fauna local. La elección de las plantas debe tener en cuenta la frecuencia y duración de la inundación, el tipo de suelo y la velocidad del caudal de agua para garantizar que la vegetación pueda desarrollarse y prosperar.

Este enfoque de bioingeniería para el manejo de la vegetación ribereña abarca un espectro de técnicas que van desde soluciones puramente vegetativas a la integración de materiales de base biológica, como estacas y productos de coco, para lograr un anclaje adicional y la estabilidad de la vegetación que se está estableciendo.

Esta estrategia abarca lo siguiente:

- La estabilización de las riberas y sus bases mediante el aprovechamiento de los sistemas radicales de las plantas nativas que no solo resisten las fuerzas hidráulicas, sino que también aglutinan las partículas del suelo, lo que reduce la erosión.
- La hidrosiembra (Ilustración 2-1) puede ser una técnica eficaz para establecer rápidamente una cobertura vegetal en las riberas y en las pendientes, y tiene un historial de éxito en Puerto Rico.<sup>4</sup> La hidrosiembra involucra el rociamiento de una mezcla de semillas, viruta, fertilizante y agua directamente sobre el suelo. Este método es sobre todo eficaz en zonas de pendientes empinadas o en ubicaciones donde la plantación tradicional resulta un reto. La hidrosiembra estabiliza el suelo de forma provisional, lo que provee una capa protectora que reduce la erosión y asiste el crecimiento de la vegetación. Cuando se utiliza junto con otras prácticas, como la colocación estratégica de plantas nativas y productos de coco, la hidrosiembra contribuye tanto a la estabilización inmediata del suelo como a la mejora a largo plazo de la integridad ecológica.

---

<sup>4</sup> Strum, “Hidrosiembra de Guánica”.



**Ilustración 2-1: Hidroslembra realizada por Protectores de Cuencas para ayudar a restaurar las riberas del río Loco en Yauco (Crédito de la foto: PDC)**

- Mejoras a la integridad ecológica y biodiversidad de las zonas ribereñas mediante la selección estratégica y la colocación de vegetación nativa a fin de crear hábitats para la fauna local y fomentar la biodiversidad.
- La utilización de productos de coco como medida de estabilización intermedia, ya que esto ofrece una superficie biodegradable que favorece el establecimiento de la vegetación al proporcionar protección al suelo y retención de la humedad cerca de la orilla del agua. La fibra de coco es una fibra natural que se extrae de la cáscara del coco y se utiliza a menudo en productos como mantos, cuerdas y redes. Las técnicas de plantación en postes integradas con capas de rocas aumentan aún más la estabilidad y proporcionan beneficios inmediatos al hábitat acuático.
- El uso de estacas vivas, estacas muertas y plantaciones de postes para mejorar la estabilidad y el crecimiento de la vegetación a lo largo de las riberas. Las estacas vivas se insertan en el suelo para que arraiguen y crezcan, lo que proporciona una estabilización inmediata y un refuerzo a largo plazo. Las estacas muertas ofrecen un apoyo estructural provisional para el suelo y contribuyen al establecimiento de otros tipos de vegetación. Las plantaciones de postes que integran una capa de rocas más grandes sirven de anclajes en el suelo y apoyan el crecimiento de una cobertura vegetal robusta.

Estos enfoques representan las técnicas más “ecológicas” de manejo de zonas ribereñas, pues se centran en crear un sistema vivo y autosostenible que evoluciona con el tiempo sin intervención estructural.

### 2.1.2. Entornos adecuados para una implementación exitosa

La eficacia de las estrategias de manejo de la vegetación depende en gran medida del contexto ambiental y de la adaptabilidad de las especies vegetales seleccionadas. Los entornos óptimos para estas estrategias apoyan un conjunto diverso de vegetación nativa que incluye gramíneas, hierbas, arbustos y árboles, cada uno de los cuales desempeña un papel vital en la estabilización del suelo y la provisión de hábitats en diferentes zonas de la quebrada. Se aconseja dar prioridad a las plantas nativas debido a su adaptación evolutiva a las condiciones locales y a sus contribuciones ecológicas. Utilizar una variedad de especies que abarquen diferentes profundidades radiculares y presenten

diversas tolerancias a la humedad y a la luz solar puede forjar una cobertura vegetal más robusta, capaz de soportar diversos retos medioambientales.

Las consideraciones clave para una implementación efectiva de la vegetación abarcan las siguientes:

- **Pendiente de ribera:** la vegetación prospera mejor en pendientes que van desde planas hasta moderadamente empinadas (hasta 1V:2H).<sup>5</sup> Para las pendientes demasiado empinadas y en riesgo de fracaso inminente, es aconsejable reducir primero la pendiente a una más manejable antes de sembrar la vegetación seleccionada. Este paso preparatorio puede mejorar de manera significativa la viabilidad de las plantas al crear un entorno más estable. En los casos en que no sea viable ajustar la pendiente de la ladera, o incluso luego de hacerlo, pueden ser necesarios métodos complementarios, como telas para el control de la erosión o el uso de estacas, para garantizar el establecimiento satisfactorio y la sostenibilidad de la vegetación en pendientes empinadas.
- **Entorno hidrológico y geomórfico:** la selección de las plantas debe ajustarse a las condiciones hidrológicas existentes y previstas, como los niveles de AHW, ALW y límite de desbordamiento, así como a las características geomórficas de la ribera. Las plantas acuáticas son adecuadas para las zonas situadas por debajo del nivel de ALW. Por otro lado, las diversas especies de gramíneas, hierbas y plantas leñosas son apropiadas para las zonas que alcanzan hasta y más allá de la marca del límite de desbordamiento, pues se adaptan a diferentes velocidades de caudal y condiciones de fuerza de tensión.<sup>6</sup>
- **Tipo y condición del suelo:** el éxito de la vegetación depende en gran medida de las características del suelo. Los suelos artificiales o compactados, a menudo desprovistos de contenido orgánico, pueden necesitar mejoras para favorecer el crecimiento de las plantas. Añadir tierra vegetal nativa o material orgánico, como el compostaje y la viruta, puede mejorar de forma significativa el establecimiento de las plantas. Estos esfuerzos de remediación del suelo son de particular importancia en las zonas con suelo desnudo que requieren reforestación y un aumento de la cobertura vegetal, lo que garantiza que el entorno del suelo sea propicio para el crecimiento tanto de las especies vegetales nativas como de las deseadas.
- **Disponibilidad de humedad:** la humedad constante y adecuada es crucial, sobre todo durante la fase inicial de crecimiento. Si bien algunas especies resisten la sequía, otras pueden necesitar riego para satisfacer sus necesidades de humedad. El uso de polímeros de suelo en zonas secas puede mejorar de forma significativa la retención de humedad en el suelo y aumentar así las tasas de supervivencia de las plantas. Los polímeros del suelo absorben y retienen el agua, liberándola progresivamente a las raíces de las plantas; esto los convierte en una solución eficaz para mantener la disponibilidad de humedad en condiciones áridas y reducir la necesidad de riegos frecuentes.
- **Luz solar y sombra:** los niveles de exposición a la luz pueden influir en el crecimiento y la supervivencia de las plantas. Las zonas con luz solar parcial o total son ideales para la mayoría de las gramíneas y plantas herbáceas. Por el contrario, algunas especies de arbustos y árboles pueden adaptarse o preferir entornos sombreados.

---

<sup>5</sup> McCullah y Gray, “Medidas de protección de canales y riberas ambientalmente sensibles”.

<sup>6</sup> Departamento de Comercio de EE. UU., “High Water Level Terminology” (Terminología relacionada con el nivel de marea alta).

- **Calendario de construcción:** el calendario de las obras y de los esfuerzos en materia de vegetación es crucial para evitar los retos que representan las temporadas de huracanes o los periodos de lluvias. Ejecutar los proyectos durante las épocas más secas del año puede reducir el riesgo de erosión y arrastre de plantas, lo que garantiza que las medidas de estabilización tengan las mayores posibilidades de éxito. Sin embargo, para ello puede ser necesario regar con frecuencia para compensar las posibilidades de desecación hasta que llegue la temporada de lluvias. La planificación en torno a estos periodos es esencial para el establecimiento eficaz de la vegetación y la estabilidad a largo plazo de las riberas.

### 2.1.3. Materiales y equipos de construcción

La selección de los materiales y equipos de construcción es esencial para el éxito del manejo de la vegetación ribereña. Estos materiales deben apoyar el establecimiento, el crecimiento y la estabilidad a largo plazo de la vegetación de las riberas. Los materiales clave incluyen los siguientes:

- **Plantas nativas:** una selección de especies adaptadas a las distintas zonas de la zona ribereña es crucial para una estabilización eficaz de las riberas. A la hora de elegir las plantas, es esencial tener en cuenta tanto el hábito vegetal (la forma o estructura general de crecimiento de la planta, como árbol, arbusto o hierba) como la condición de humedal, que indica la probabilidad de que una planta se dé en zonas húmedas o no húmedas. El hábito de la planta influye en su contribución al control de la erosión, la provisión de hábitats y el valor estético en su ubicación específica a lo largo de la ribera. La condición de humedal informa la selección de especies en función de sus preferencias de humedad. Por ejemplo, las especies obligadas a vivir en humedales (OBL, por sus siglas en inglés) prosperan en condiciones húmedas; las plantas facultativas (FAC, por sus siglas en inglés) que tienen las mismas probabilidades de vivir en humedales o en zonas no húmedas; y las especies de tierras altas (UPL, por sus siglas en inglés) que prefieren suelos más secos. Esto garantiza que se adapten a las condiciones ambientales de su zona de plantación.

Las plantas nativas se eligen por su adaptabilidad a las condiciones locales y sus beneficios ecológicos. Esta selección incluye una variedad de pastos, juncias, arbustos y árboles para las áreas superiores de la ribera, donde las condiciones del suelo tienden a ser más secas y estables; las especies herbáceas y arbustivas para proporcionar estabilidad a las laderas y diversidad de hábitat en laderas medias; y plantas de humedal adecuadas para tales condiciones del pie de la ribera o de las zonas ribereñas. La Tabla 2-2 provee ejemplos de plantas nativas de Puerto Rico recomendadas para cada zona de la ribera, incluyendo el pie de la ribera, clasificadas tanto por su hábito vegetal como por su condición de humedal para ayudar en la selección de la vegetación. Para obtener una definición detallada de cada hábito vegetal y condición de humedal, véase el apéndice.

- **Hidrosiembra:** constituye una forma eficaz de cubrir grandes superficies en poco tiempo y requiere una mezcla especializada de residuos compuesta por semillas de césped, virutas, agua y, a veces, enmiendas del suelo o fertilizantes que se pulverizan sobre la tierra preparada con una máquina hidrosembradora. El equipo para la hidrosiembra incluye la propia hidrosembradora, que mezcla y rocía el residuo, y otras herramientas para la preparación de la ubicación y los cuidados posteriores a la aplicación, como sistemas de riego para garantizar que la zona sembrada reciba la humedad adecuada para la germinación y el establecimiento. Esta técnica es de especial utilidad en el manejo de la vegetación ribereña, sobre todo en zonas donde las técnicas convencionales de plantación pueden no ser viables o eficaces, o donde se necesita cubrir el suelo con urgencia.
- **Productos de coco:** los mantos, troncos y rollos de coco, derivados de las cáscaras fibrosas de los cocos, proporcionan un apoyo estructural provisional. Fomentan la deposición de sedimentos

y el crecimiento de la vegetación al ofrecer un medio que retiene la humedad y protege el suelo de la erosión. Estos materiales biodegradables son de gran utilidad en zonas donde se necesita una estabilización inmediata para apoyar el establecimiento de vegetación nativa.

- **Geotextiles:** los geotextiles, algunos de los cuales son biodegradables, se emplean para brindar apoyo para el suelo y favorecer la integración de plantas y raíces. Sirven para evitar la erosión, mejorar la retención de humedad y proporcionar un medio de crecimiento para las raíces. Los geotextiles se seleccionan en función de las necesidades de permeabilidad y retención del suelo, con opciones como tejidos y no tejidos para adaptarse a diversas condiciones ambientales y metas del proyecto.
- **Esquejes y estacas vivas:** los esquejes de especies con rápida capacidad de desarrollo radicular y propiedades de estabilización del suelo son valiosos para la estabilización inmediata y contribuyen al refuerzo de la ribera a largo plazo. Sin embargo, en Puerto Rico la selección de especies adecuadas para esta práctica requiere una consideración cuidadosa, ya que pocas especies nativas pueden poseer los rasgos ideales para estacas vivas. Las especies leñosas que se propagan por esquejes a menudo carecen de una raíz principal o de anclaje fuerte, lo que hace que estos individuos sean más susceptibles de fracasar y caer. Además, es importante abordar las preocupaciones relacionadas con la propagación de material de plantación por medios vegetativos. Estos métodos pueden afectar de manera negativa a la diversidad genética y aumentar la vulnerabilidad de las especies a las enfermedades. Para mitigar estos riesgos es crucial diversificar las fuentes genéticas de los esquejes y, posiblemente, integrar una variedad de especies en los proyectos de estabilización. Este enfoque no solo ayuda a preservar la diversidad genética, sino que también aumenta la resistencia del ecosistema frente a plagas y enfermedades.
- **Suministros para sembrar:** entre ellos se incluyen mantillos para retener la humedad y eliminar las malas hierbas, tutores para dar apoyo a las plantas jóvenes y refugios para proteger los árboles jóvenes de la fauna. Los materiales de mantillo, como virutas de madera o paja, se seleccionan en función de su capacidad para conservar la humedad del suelo, proporcionar moderación de la temperatura y mejorar la fertilidad del suelo al descomponerse. Los polímeros del suelo pueden ser un valioso complemento a estos suministros, sobre todo en zonas secas o para plantas con grandes necesidades de humedad. Estos polímeros absorben el agua y la liberan poco a poco, lo que garantiza una disponibilidad constante de humedad para las plantas y reduce la necesidad de riegos frecuentes.
- **Herramientas y equipos de jardinería paisajista:** para preparar la ubicación e instalar las plantas se necesitan herramientas fundamentales, como palas, paletas y rastrillos. En proyectos de mayor envergadura puede ser necesario utilizar equipos mecanizados, como retroexcavadoras, para la nivelación de la ubicación, la excavación y el transporte de materiales.

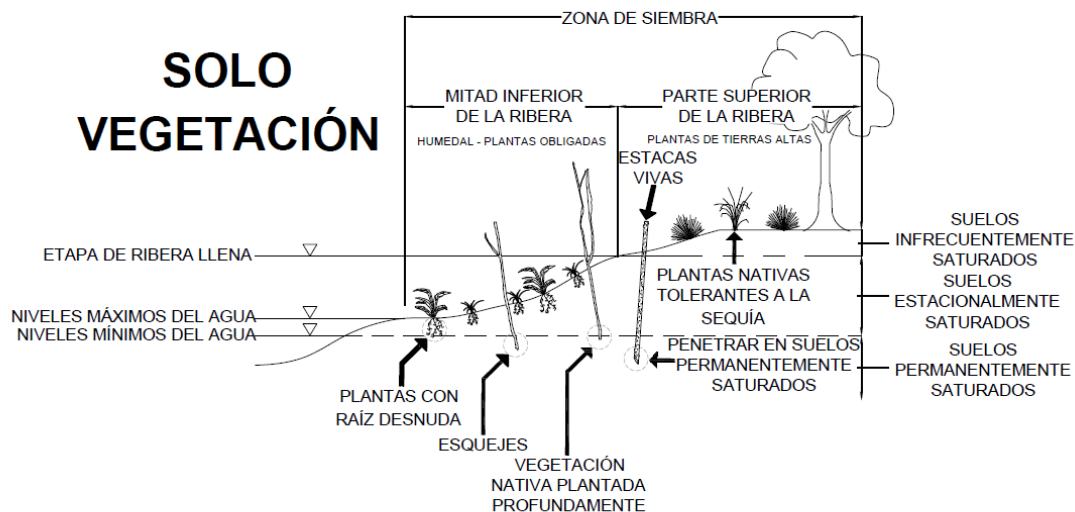
#### 2.1.4. Secciones típicas

##### Solo vegetación

En la Ilustración 2-2, se muestra una sección típica sobre la estrategia de “solo vegetación” para la estabilización ribereña, que incorpora técnicas específicas de plantación adecuadas a las condiciones hidrológicas y del suelo de cada zona de la ribera. A la hora de planificar la vegetación en estas zonas, el diseño debe basarse en consideraciones medioambientales, como la elevación prevista del agua, la velocidad del caudal, el tipo de suelo y la inclinación de la ribera. La integración del apoyo estructural con las técnicas vegetativas ayuda a aumentar la resistencia de la cobertura vegetal frente a las fuerzas erosivas. La Tabla 2-2 ofrece una descripción general de los hábitos de



las plantas, su condición de humedal y sus aplicaciones para la estabilización de riberas en diferentes zonas. La Tabla 2-3 desglosa las especies nativas específicas: detalla sus hábitos, mejores usos, alturas, tipos de suelo, tipos de raíces, usos en soluciones basadas en la naturaleza y requisitos de mantenimiento. Para una definición detallada de cada hábito vegetal y condición de humedal, véase el apéndice de este documento.



**Ilustración 2-2: Sección típica para el uso de solo vegetación para la estabilización. Adaptado de McCullah y Gray, 2005.<sup>7</sup>**

- **Ribera superior** (zona de plantas de tierras altas): la zona más alta, que se inunda solo con las inundaciones más extremas. Requiere especies adaptadas a suelos secos y poco saturados. Para la zona de la ribera superior, se recomienda dar prioridad a las especies arbóreas, como el higuerón (*Ficus citrifolia*), el bálsamo de María (*Calophyllum antillanum*) y el roble blanco (*Tabebuia heterophylla*) sobre otras plantas, como los arbustos. Estos árboles proporcionan estabilidad y control de la erosión y son adecuados para los estados más secos cerca de la parte superior de la ribera. La hidrosiembra puede establecer una primera línea de defensa con una mezcla de semillas, virutas y estabilizadores que se adhieren a la superficie del suelo. En los casos en que el suelo existente sea de tipo artificial y carezca de riqueza orgánica, es posible introducir trasplantes enraizados en suelos mejorados, como gramíneas autóctonas de Puerto Rico, incluyendo especies como la yerba de pelos (*Muhlenbergia capillaris*).
- **Ribera media-baja** (zona de plantas obligadas a vivir en humedales): en la zona de transición a la ribera media-baja, la introducción de tallos plantados en profundidad facilita el establecimiento de especies que favorecen los suelos húmedos por temporadas. Esta zona se beneficia de la vegetación nativa con rápido crecimiento; sistemas radiculares profundos para el control de la erosión y que puede propagarse con facilidad a partir de plantas, tallos o estacas, según proceda. Luego de que arraiga, esta vegetación refuerza la ribera contra fuerza de tensión de hasta 30 *newtons* por metro cuadrado ( $N/m^2$ ) (0.6 libras por pie cuadrado [ $lb/ft^2$ ]), lo que es comparable a las plantaciones de juncos establecidas. Estas plantas no solo estabilizan la ribera, sino que también enriquecen el hábitat ribereño.
- **Base de la ribera** (zona de inundación): al borde del agua, la atención se centra en las especies que pueden sobrevivir en condiciones de suelos saturados de forma permanente y de inmersión

<sup>7</sup> McCullah y Gray, "Medidas de protección de canales y riberas ambientalmente sensibles".

frecuente. Aquí, las plantas deben resistir tensiones de cizallamiento equivalentes a las que soportan las plantaciones de juncos establecidas, de hasta 30 N/m<sup>2</sup> (0.6 lb/ft<sup>2</sup>), y velocidades de caudal que pueden superar los 1.5 metros por segundo (m/s) (5 pies por segundo [ft/s]).<sup>8</sup> Puede ser necesario un soporte estructural adicional, como mantas de control de la erosión, para proteger la cobertura vegetal de las fuertes corrientes de agua. Las plantaciones adecuadas en esta zona incluyen variedades puertorriqueñas de gramíneas y juncias que sobresalen en condiciones de humedad constante y contribuyen a la filtración natural de contaminantes transportados por el agua.<sup>8</sup>

**Tabla 2-2: Plantas clasificadas por zona de ribera, hábito, condición de humedal y sus aplicaciones para la estabilización de riberas. Para una definición detallada de cada hábito vegetal y condición de humedal, véase el apéndice de este documento.**

Zona	Forma de crecimiento	Condición de humedal	Aplicación
Ribera superior	Árbol	FACU, UPL	Los grandes sistemas radiculares proporcionan estabilidad y control de la erosión. Adecuado para estados más secos cerca de la parte superior de la ribera.
	Arbusto	FACU, UPL	Útil para añadir estructura y estabilizar el suelo en riberas superiores más secas. Las palmeras también pueden aparecer en estas zonas (por ejemplo, <i>Acrocomia media</i> en zonas más secas y <i>Aiphanes minima</i> y <i>Prestoea acuminata</i> en zonas húmedas) y tienen sistemas radiculares notoriamente fuertes.
	Helecho	FAC, FACW	Adecuado para zonas con lluvias frecuentes. Los helechos tienden a secarse rápido y pueden aumentar el riesgo de incendios forestales si se establecen en zonas más secas.
Pendiente media	Graminoide	FAC, FACW	Hierbas y juncias que pueden estabilizar el suelo; adaptables a distintos grados de humedad.
	Forbia	FAC, FACW	Las plantas herbáceas añaden biodiversidad y pueden tolerar niveles de agua fluctuantes.
	Plantas trepadoras	FAC, FACW	Puede proporcionar cobertura del suelo y estabilizar los suelos con su hábito de propagación.
Base ribereña	Forbia	OBL	Prospera en suelos húmedos o aguas poco profundas. El uso de plantas nativas ofrece importantes beneficios ecológicos, como la estabilización del suelo con su robusto sistema radicular y la creación de hábitats para la fauna silvestre.
	Graminoide	OBL, FACW	Eficaz en el borde del agua para controlar la erosión y proporcionar hábitat.

<sup>8</sup> McCullah y Gray, "Medidas de protección de canales y riberas ambientalmente sensibles".

	Graminoide	OBL	Bien adaptada a condiciones húmedas, incluso estando parcial o totalmente sumergida; su denso crecimiento y extenso sistema radicular pueden brindar apoyo para la reducción de la erosión del suelo y favorecer la acumulación de sedimentos.
--	------------	-----	--

Notas: FAC = facultativa; FACU = facultativa en tierras altas; FACW = facultativa en humedal; OBL = obligada a vivir en humedales; UPL = tierras altas

**Tabla 2-3: Plantas nativas y naturalizadas de Puerto Rico clasificadas por zona, mejores usos, usos en soluciones basadas en la naturaleza y requisitos de mantenimiento y funcionamiento. Adaptado de Urban Hydrologics, 2024.<sup>9</sup>**

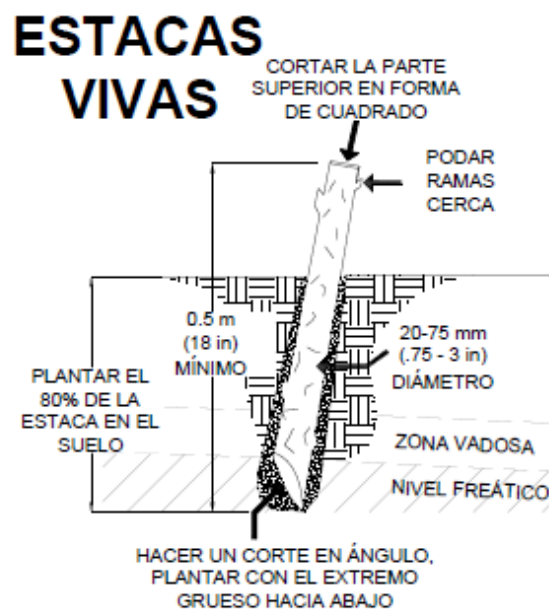
Zona	Nombre científico	Nombre común	Hábito	Altura	Tipo de suelo	Tipo de raíz	Usos en SNBN	Mantenimiento y funcionamiento
Ribera superior	<i>Andropogon bicornis</i>	Barbas de indio	Graminoide	1-2 m	Varios, ácido/ alcalino, húmedo	Raíz fibrosa	Control de la erosión, estabilización en suelos erosionados	Poda mínima, asegurar presencia nativa
	<i>Andropogon leucostachyus</i>	Rabo de vaca	Graminoide	0.3-0.5 m	Ácido, en pendiente	Raíz fibrosa	Estabilización en suelos pobres y erosionados	Poda ocasional, mantener presencia en zonas competitivas
	<i>Chloris gayana</i>	Zacate Rhodes	Graminoide	0.6-1.5 m	Bien drenado, húmedo a semiárido	Raíz fibrosa	Control de la erosión, estabilización de riberas	Poda regular para mantener la densidad
	<i>Cenchrus echinatus</i>	Cadillo	Graminoide	Hasta 0.38 m	Arenoso, arcilloso, costero	Raíz fibrosa	Control de la erosión en playas y costas	Poda mínima, resembrar si es necesario
Pendiente media	<i>Arthrostylidium sarmentosum</i>	Bambú trepador	Graminoide	2.7 m	Varios, húmedo	Raíz fibrosa	Estabilización de pendientes y márgenes forestales	Poda para mantener la forma, monitorizar las plagas
	<i>Cymbopogon citratus</i>	Limoncillo	Graminoide	Hasta 2 m	Varios, bien drenados	Raíz fibrosa	Control de erosión, barreras vegetativas, estabilización	Poda regular para mantener la altura, fertilizante ocasional

<sup>9</sup> Urban Hydrologics, "Recomendación de Plantas para la Estabilización de Riberas en Ríos y Quebradas de PR".

Zona	Nombre científico	Nombre común	Hábito	Altura	Tipo de suelo	Tipo de raíz	Usos en SNBN	Mantenimiento y funcionamiento
	<i>Vetiveria zizanioides</i>	Vetiver	Graminoide	Hasta 2 m	Varios, húmedo	Raíz fibrosa	Control de erosión, barreras vegetativas	Poda regular para mantener la altura y la densidad
	<i>Arundo donax</i>	Caña común	Graminoide	Hasta 6 m	Varios, húmedo	Rizoma grueso, raíces fibrosas	Estabilización de riberas y pendientes	Poda mínima, resembrar para mantener la densidad
Base ribereña	<i>Digitaria eriantha</i>	Pangola	Graminoide	Hasta 1 m	Fértil, arcilloso	Estolones, raíces fibrosas	Control de la erosión, estabilización de riberas	Poda regular, mantener la densidad de estolones

## Estacas vivas

Las estacas vivas, representadas en la Ilustración 2-3, son una práctica de bioingeniería que utiliza estacas vivas que se insertan en el suelo de la ribera para fomentar el crecimiento de las raíces y la cobertura vegetal. Este proceso proporciona un refuerzo estructural del suelo y un control de la erosión. Las estacas, una vez arraigadas, crean una alfombra de raíces vivas que aglutina las partículas del suelo y reduce el potencial de erosión. La Tabla 2-4 presenta las especies de árboles y arbustos que pueden crecer a partir de estacas vivas y que se recomiendan para el establecimiento de amortiguadores o corredores ribereños en Puerto Rico.<sup>10</sup>



**Ilustración 2-3: Diseño típico para una estaca viva que se instala en una matriz espaciada uniformemente a lo largo de la ribera para crear una red de raíces. Adaptado de McCullah y Gray, 2005.<sup>11</sup>**

<sup>10</sup> Servicio Forestal del Departamento de Agricultura (USDA, por sus siglas en inglés), Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos, Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico y EnviroSurvey, Inc., "Guía de Árboles Nativos para Prácticas de Conservación en Puerto Rico e Islas Vírgenes Americanas".

<sup>11</sup> McCullah y Gray, "Medidas de protección de canales y riberas ambientalmente sensibles".

**Tabla 2-4: Especies de árboles y arbustos que pueden crecer de estacas vivas o postes tensados<sup>12</sup>**

Nombre en español	Nombre científico
Almácigo	<i>Bursera simaruba</i>
Chicharroncillo	<i>Schaefferia frutescens</i>
Icaco	<i>Chrysobalanus icaco</i>
Mamey silvestre	<i>Clusia rosea</i>
Almendra de río	<i>Terminalia buceras</i>
Algarrobo	<i>Hymenaea courbaril</i>
Guaba	<i>Inga vera</i>
Péndula blanca	<i>Vitex divaricata</i>
Ceiba	<i>Ceiba pentandra</i>
Guácima	<i>Guazuma ulmifolia</i>
Jagüey blanco	<i>Ficus trigonata</i>
Jagüey	<i>Ficus citrifolia</i>
Jagüey colorado	<i>Ficus americana</i>
Cedro macho	<i>Hieronyma clusioides</i>
Mabí	<i>Colubrina arborescens</i>
Rabo de ratón	<i>Casearia arborea</i>

Para preparar e instalar estacas vivas de forma eficaz,<sup>13</sup> empiece por seleccionar estacas que tengan un diámetro de entre 20 y 75 milímetros (0.75 y 3 pulgadas) y una longitud mínima de 0.5 metros (18 pulgadas). Saque las ramas laterales y, a la vez, mantenga intacta la corteza para conservar la integridad de la estaca. El extremo base (inferior) de cada estaca debe cortarse en ángulo para facilitar su inserción en el suelo, mientras que el extremo apical (superior) se corta en escuadra para evitar la captación de agua que podría provocar el deterioro.

Al instalar las estacas, colóquelas de modo que el extremo cortado en ángulo quede orientado hacia

<sup>12</sup> Servicio Forestal del USDA, Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos, Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico y Envirosurvey, Inc., “Guía de Árboles Nativos para Prácticas de Conservación en Puerto Rico e Islas Vírgenes Americanas”.

<sup>13</sup> Eubanks y Meadows, “A Soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization”

abajo para garantizar la dirección de crecimiento correcta. Inserte las estacas en el suelo a gran profundidad, con aproximadamente el 80% de su longitud plantada para alcanzar la zona vadosa por debajo de la capa freática. Esta profundidad maximiza la probabilidad de éxito del arraigo y aprovecha la humedad del suelo para el crecimiento inicial.

Coloque las estacas a una distancia de entre 2 y 3 pies, con un patrón de espaciado triangular. Este espacio ayudará a crear una red de raíces que estabilizará el suelo. Luego, compacte el suelo con firmeza alrededor de cada estaca para asegurarlas. Si lo desea, puede utilizar tela geotextil en pendientes propensas a inundaciones erosivas e instalar las estacas a través de la tela. Este método es efectivo para reparar pequeños deslizamientos y desprendimientos de tierra y es beneficioso para zonas donde el tiempo de construcción es limitado.

Al colocar las estacas vivas se debe tener en cuenta el esfuerzo de tensión y las velocidades de caudal asociadas a la ubicación específica de la ribera. Se espera que las estacas arraigadas soporten los esfuerzos de tensión, lo que contribuirá a la resistencia de la ribera a las fuerzas erosivas. Generalmente, el esfuerzo de tensión admisible para esta técnica es de aproximadamente 120 N/m<sup>2</sup> (2.5 lb/ft<sup>2</sup>) y la velocidad admisible es de aproximadamente 0.9 m/s (3 ft/s).<sup>14</sup>

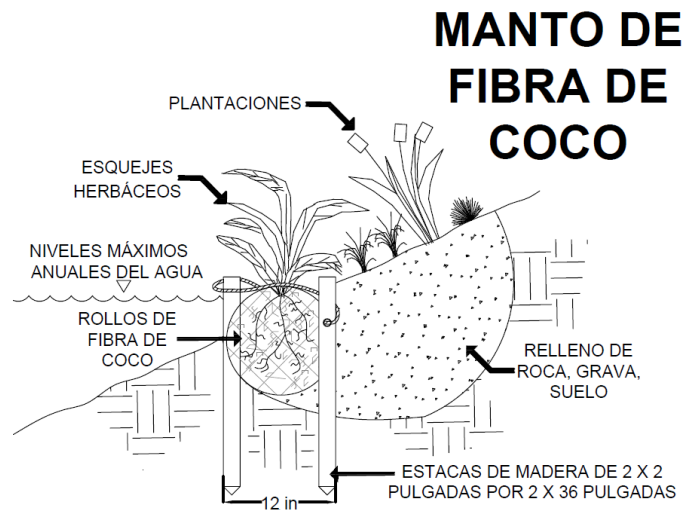
---

<sup>14</sup> Fischenich, "Stability Thresholds for Stream Restoration Materials".



## Mantos de fibra de coco

La Ilustración 2-4 muestra el uso de rollos de fibra de coco, también conocidos como rollos de coco, que están hechos de fibras de cáscara de coco unidas dentro de una red geotextil. Sirven como armadura blanda en el pie de la ribera o en las riberas para proteger contra la erosión y promover el crecimiento de la vegetación, en especial en zonas de esfuerzo de tensión de caudal bajo a moderado.



**Ilustración 2-4: Sección de rollos de fibra de coco con plantaciones y tapones herbáceos  
Adaptado de McCullah y Gray, 2005.<sup>15</sup>**

Para instalar los rollos de fibra de coco de manera efectiva,<sup>16</sup> empiece por excavar una zanja poco profunda en la base de la pendiente, un poco por debajo del nivel AHW para garantizar un acoplamiento adecuado con el caudal de agua y la dinámica de los sedimentos. Coloque el rollo de fibra de coco dentro de esta zanja para asegurarse de que se ajuste a la curvatura de la ribera.

Asegure los rollos con estacas de madera de 2 pulgadas cuadradas, clavadas a profundidad en el material de la ribera para mayor estabilidad, con una separación de 2 a 4 pies, según la velocidad prevista del agua. En las zonas en las que sea necesario reforzar las estacas, se pueden hacer hendiduras a ambos lados del rollo de fibra y asegurarlas con alambre de calibre 16 o, como alternativa, utilizar cables con anclajes de pico de pato. Rellene la zanja con tierra para apoyar la estabilidad del rollo e instale tapones herbáceos arraigados en los rollos y en la zona de la ribera adyacente para mejorar el establecimiento de las plantas y el desarrollo del sistema radicular, lo que potenciará la estabilización y la función ecológica.

El objetivo de los rollos de fibra de coco es contribuir a la estabilización del canal y de la orilla en zonas con velocidades de agua moderadas. El establecimiento de vegetación alrededor de los rollos

<sup>15</sup> McCullah y Gray, "Environmentally Sensitive Channel- and Bank-Protection Measures".

<sup>16</sup> Eubanks y Meadows, "A Soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization".

de fibra aumenta la rugosidad de la superficie, que a su vez puede ralentizar la velocidad del agua y favorecer la acumulación de sedimentos, lo que ayuda a la estabilidad de las riberas y a la creación de hábitats.

A la hora de elegir las plantas que se insertarán en los rollos de fibra de coco, es crucial seleccionar especies que puedan soportar la fuerza de tensión y las condiciones de caudal específicos de la ubicación, así como las condiciones locales de clima y suelo. Los mantos de fibra de coco con vegetación son capaces de soportar esfuerzos de tensión de hasta 383.6 N/m<sup>2</sup> (8 lb/ft<sup>2</sup>) y velocidades de 2.9 m/s (9.5 ft/s), mientras que los rollos de fibra de coco por sí solos pueden resistir fuerza de tensión de hasta 239.8 N/m<sup>2</sup> (5 lb/ft<sup>2</sup>) y velocidades de 2.4 m/s (8 ft/s).<sup>17</sup>

### 2.1.5. Monitoreo y manejo adaptativo

El manejo eficaz de las técnicas no estructurales de estabilización de riberas, como la plantación de vegetación, las estacas vivas y los rollos de fibra de coco, requiere un monitoreo continuo y un manejo adaptativo para garantizar el éxito de su establecimiento y longevidad. En Puerto Rico, las plantas no tienen una estación de crecimiento definida, sino que reaccionan con fuerza a las lluvias importantes y a menudo producen nuevas hojas y ramas. Este patrón de crecimiento dinámico requiere programas de mantenimiento flexibles. Las inspecciones iniciales deben realizarse cada semana durante el primer mes después de la instalación para monitorizar de cerca las primeras etapas de crecimiento de la vegetación y de las estacas vivas, y asegurar su arraigo y desarrollo.

Luego de este periodo inicial, se recomienda realizar inspecciones quincenales hasta que el sistema se haya establecido luego del primer año. Durante los periodos de precipitación intensa, pueden ser necesarias inspecciones adicionales para evaluar y apoyar las respuestas de crecimiento rápido. Los rollos de fibra de coco exigen atención durante toda su vida funcional, por lo general entre 6 y 10 años, para monitorizar su estado y el éxito de la integración de la vegetación.

Además, después de cualquier evento de lluvia significativo, se recomienda realizar una inspección especial de las medidas de estabilización para evaluar su condición e integridad. Esto ayuda a identificar y abordar cualquier asunto inmediato causado por el evento de lluvia, como la deposición de sedimentos, el desplazamiento de plantas o materiales o la erosión inesperada.

Las actividades de mantenimiento deben incluir la pronta sustitución de las plantas no viables, un riego adecuado a las necesidades de la vegetación durante la fase de establecimiento y medidas de protección contra posibles daños causados por la fauna. En caso de que el monitoreo revele debilidades estructurales, como anclajes comprometidos en los rollos de fibra de coco o erosión en puntos críticos, es necesario adoptar medidas correctivas. Esto puede involucrar el refuerzo de las estacas, el ajuste de la posición de los rollos de fibra o la aplicación de enmiendas del suelo.

### 2.1.6. Estimaciones de costos

Las estimaciones de costos para las medidas SNBN se enumeran en la Tabla 2-5.

**Tabla 2-5: Estimaciones de costos para medidas SNBN**

Sección típica	Costo
Plantas	\$10.00 por planta

<sup>17</sup> Fischenich, "Umbral de estabilidad para materiales de restauración de quebradas".

Sección típica	Costo
Hierba de raíces profundas	\$5.22 por SY
Hidrosiembra	\$115.00 por SY
Estaca viva	\$2.50 por estaca
Malla de fibra de coco/yute.	\$1.11 por CY
Preparación de los lechos de plantación, relleno del hoyo de plantación, tierra vegetal en la ubicación, a mano	\$57.17 por hora
Preparación del suelo, mezcla de suelo estructural, esparcimiento de tierra vegetal, minicargadora y tratamiento manual	\$9.94 por hora

CY = yarda cúbica; SY = yarda cuadrada

## 2.2. Medidas estructurales con vegetación

### 2.2.1. Descripción de soluciones y objetivos

Las medidas estructurales con vegetación son técnicas híbridas que combinan la protección mecánica de las estructuras con los beneficios ecológicos de la vegetación para estabilizar las riberas y mejorar el hábitat. Estas medidas combinan la ingeniería dura con la infraestructura verde, pues integran la vegetación nativa en las estructuras de protección para crear sistemas vivos que son más resistentes que los materiales estructurales inertes por sí solos. Estas medidas suelen incluir revestimientos rocosos con vegetación, bloques de cemento articulados con vegetación y paletas de roca que incorporan materiales vegetales vivos. Los objetivos son proporcionar una estabilidad estructural inmediata a las riberas y pendientes a la vez que se establece una cobertura vegetal para el control continuo de la erosión y la creación de hábitats. Las medidas estructurales con vegetación están diseñadas para resistir las fuerzas ejercidas por el caudal de agua y los retos gravitacionales que plantean las pendientes de moderadas a altas.

Las principales medidas estructurales con vegetación recomendadas para una estabilización eficaz de las riberas incluyen:

- **Revestimiento rocoso con vegetación:** este método tradicional de control de la erosión involucra la colocación de piedras de distintos tamaños a lo largo de las riberas o pendientes. Se planta vegetación entre las piedras para proporcionar estabilización adicional, refuerzo de las raíces y hábitat ecológico, lo que convierte al revestimiento rocoso en una solución eficaz para zonas con velocidades de caudal de moderadas a altas. Las especies vegetales se seleccionan en función de su capacidad para crecer entre las rocas y resistir la inmersión periódica. Las plantas nativas como las Barbas de indio tienen estructuras herbáceas que estabilizan el suelo y son capaces de soportar velocidades de caudal de moderadas a altas.
- **Bloques de cemento articulados con vegetación:** son unidades de cemento entrelazadas con espacios que permiten que la tierra y las plantas se establezcan en su interior. Estos bloques proporcionan una protección inmediata de la ribera y un medio para el crecimiento de las plantas. En las aberturas de los bloques se plantan especies nativas. Con el tiempo, las raíces de estas plantas crecen para asegurar aún más los bloques y mejorar la resistencia de la ribera

a la erosión.

- **Guías de roca con plantaciones:** son estructuras formadas por grandes rocas colocadas en la quebrada para desviar el caudal de la ribera. Cuando están cubiertas de vegetación, no solo redirigen el caudal, sino que también proporcionan hábitat y estabilizan la ribera. La selección de la vegetación para las paletas de roca incluye especies que puedan sobrevivir en las condiciones dinámicas de un cauce y que puedan establecerse en los espacios entre las rocas.
- **Protección de base de piedras longitudinal con vegetación:** se trata de una técnica que consiste en colocar piedras a lo largo del cauce en la base de una ribera, para estabilizar la zona del pie de la ribera y evitar una mayor erosión. Este método es eficaz, tanto para preservar la vegetación existente en la ribera como para fomentar el crecimiento de vegetación adicional, lo que ayuda a la estabilización general de la pendiente de la ribera. Está diseñado para estabilizar la base con una alteración mínima de la ribera superior, lo que fomenta los procesos naturales para lograr la estabilización de la ribera superior a través del rebrote de la vegetación.

### 2.2.2. Entornos adecuados para una implementación exitosa

Los entornos adecuados para las medidas estructurales con vegetación son las zonas donde el equilibrio entre la necesidad de un control sólido de la erosión y los beneficios ecológicos es fundamental. A menudo, estos entornos se enfrentan a retos, como las velocidades de caudal de marea alta o las frecuentes fluctuaciones de los niveles de agua, en los que la plantación aislada podría no ser suficiente para la estabilización de las riberas. En estos casos, la integración de la vegetación nativa con el soporte estructural proporciona el doble beneficio de la protección inmediata contra la erosión y el establecimiento de un hábitat a lo largo del tiempo.

La protección de base de piedras longitudinal con vegetación, por ejemplo, coloca piedras a lo largo del cauce en la base de una ribera, lo que estabiliza la zona para así evitar una mayor erosión. Resulta sobre todo eficaz en entornos con flujos de alta velocidad, ya que la robustez de la piedra puede soportar mejor las fuerzas ejercidas por el agua en movimiento que materiales más flexibles, como los rollos de fibra de coco. Los rollos de fibra de coco son más adecuados para zonas con velocidades de caudal moderadas y donde se prefiere un material biodegradable que se integre perfectamente con el material natural de la ribera con el paso del tiempo. Aunque ambos sirven para proteger y estabilizar las riberas, la elección entre la protección de base de piedras longitudinal con vegetación y los rollos de fibra de coco depende en gran medida de las condiciones hidráulicas específicas y de las consideraciones medioambientales de la ubicación.

Estos sistemas híbridos son muy útiles en vías fluviales urbanas o suburbanas, donde el espacio para zonas ribereñas extensas es limitado, o en regiones agrícolas donde la escorrentía es importante y puede contribuir a la erosión de las riberas. En zonas restauradas o naturalizadas que requieren refuerzos para evitar la erosión, las medidas estructurales con vegetación ofrecen una solución sostenible.

En Puerto Rico, la atención se centraría en la selección de especies nativas y naturalizadas descritas con más detalle en la sección anterior sobre el manejo de la vegetación ribereña. Estas especies son capaces de resistir las condiciones locales, que incluyen las fuertes lluvias y los picos de caudal asociados. Las especies vegetales elegidas deben ser aquellas que puedan arraigar entre las rocas del revestimiento rocoso, dentro de los espacios de los bloques de cemento articulados o junto a otros materiales estructurales, a la vez que proporcionan las funciones ecológicas necesarias.

### 2.2.3. Materiales y equipos de construcción

Los materiales y equipos de construcción suelen involucrar piedras de origen local que se adaptan a las necesidades hidráulicas, plantas nativas seleccionadas en función de las condiciones

ambientales, anclajes para aumentar la estabilidad y maquinaria pesada para mover y colocar los elementos estructurales.

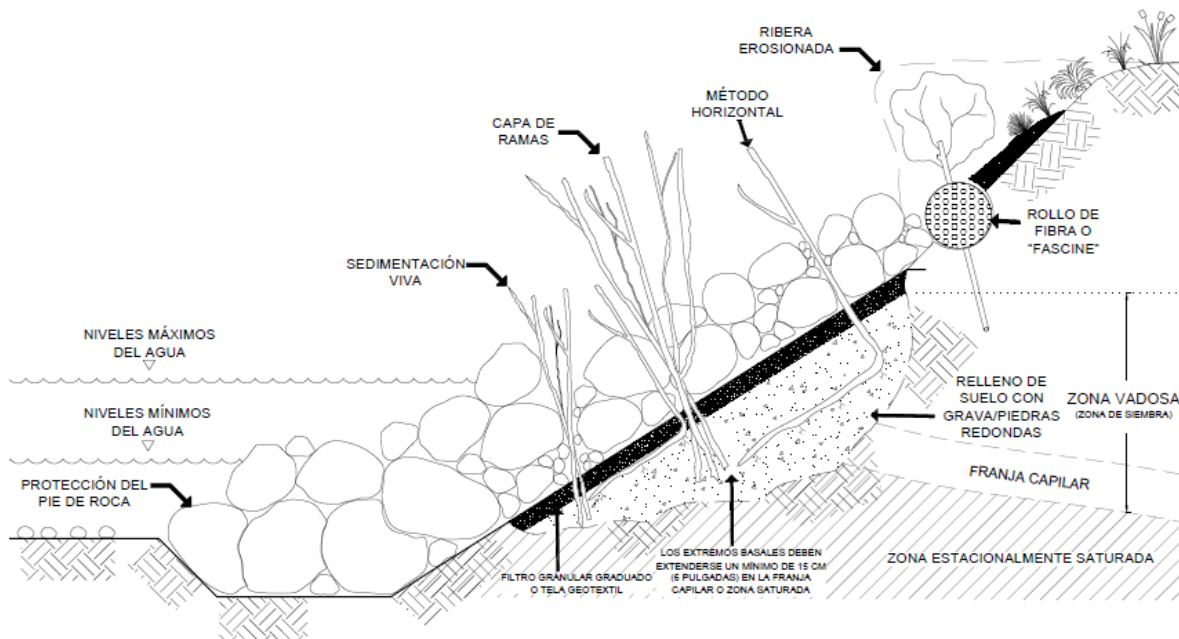
- **Piedras:** el material principal para la protección de base de piedras y revestimiento rocoso con piedras de origen local, seleccionadas en función de su tamaño y peso para satisfacer las necesidades específicas de control de la erosión y las fuerzas hidráulicas de la quebrada. Las piedras se colocan para formar una capa protectora a lo largo de la base y, a menudo, requieren maquinaria para colocarlas debido a su peso.
- **Piedras de lanzamiento automático:** estas piedras seleccionadas específicamente se clasifican para garantizar que puedan entrelazarse y ajustarse con el tiempo, y asentarse de forma natural en los agujeros de abrasión o en las zonas en las que el cauce se está erosionando. Su capacidad de “lanzarse” o moverse ligeramente con el caudal permite que la estructura se adapte a las condiciones hidráulicas cambiantes sin comprometer la estabilidad. Esta interacción dinámica entre las piedras y el caudal de agua minimiza las necesidades de mantenimiento y aumenta la longevidad de las medidas de control de la erosión.
- **Bloques de cemento articulados con vegetación (ACB, por sus siglas en inglés):** un sistema híbrido de control de la erosión diseñado para zonas de alta velocidad y fuerzas de tensión, los ACB son bloques interconectados unidos a un tejido geotextil que proporciona una protección duradera contra la erosión. La instalación involucra la nivelación de la ribera, la colocación de los mantos de ACB por debajo del nivel previsto de la base de la ribera y la integración de la vegetación mediante estacas vivas insertadas en el suelo por encima de la marca AHW. Este sistema no solo ofrece una protección sólida, sino que también fomenta beneficios ecológicos al facilitar el crecimiento de la vegetación, lo que mejora el atractivo estético y el valor del hábitat de la zona.
- **Vegetación:** las especies de plantas nativas deben seleccionarse por su capacidad para prosperar en el entorno local y complementar la estructura de piedra. Entre ellas pueden incluirse árboles y arbustos de raíces profundas para la estabilidad de la ribera superior y plantas herbáceas para la estabilización inmediata del suelo.
- **Anclajes:** en zonas con riberas muy erosionables se instalan anclajes de piedras u otros materiales duraderos a intervalos para anclar la estructura y evitar la erosión detrás de la base de piedras.
- **Equipo de instalación:** el equipo de instalación incluye maquinaria pesada para mover y colocar piedras, herramientas manuales para plantar vegetación y, en caso necesario, embarcaciones para acceder a zonas de difícil alcance a lo largo de un río.

#### 2.2.4. Secciones típicas

##### Revestimiento rocoso vegetal

La sección típica que se muestra en la Ilustración 2-5 representa métodos para construir revestimiento rocoso vegetales. Este método incorpora revestimiento rocoso de roca dura con vegetación viva para establecer un sistema de revestimiento dinámico que funciona con eficacia entre los niveles AHW y ALW de la masa de agua que protege.

## REVESTIMIENTO ROCOSO VEGETADO



**Ilustración 2-5: Sección típica de revestimiento rocoso vegetal. Adaptado de McCullah y Gray, 2005.<sup>18</sup>**

El sistema de revestimiento rocoso comienza con una base sólida de protección de la base de piedras. Esta protección consiste en un conjunto de piedra nivelada instalada en la marca ALW, que sirve como defensa de primera línea contra la erosión. La construcción se inicia al colocar la pendiente de la ribera en un ángulo algo inferior al de la pendiente final deseada y, si es necesario, excavar una zanja de protección y rellenarla con rocas clave y con grava de filtro colocada entre el suelo y las rocas, que se extiende de 0.9 a 1.2 metros (3 a 4 pies) hacia arriba de la ribera.

Por encima de esta capa rocosa de cimientos, se recomienda sembrar árboles jóvenes en las partes superiores de las riberas para mejorar tanto la integridad estructural como el valor ecológico de la ribera hasta la marca AHW. Esta ubicación estratégica potencia tanto la integridad estructural como el valor ecológico de la ribera hasta la marca AHW. Además, la integración de estos árboles jóvenes en la estructura del revestimiento rocoso mejora la estabilización. A medida que los árboles jóvenes maduren, sus raíces se entrelazarán con revestimiento rocoso, lo que aumenta de forma significativa la resistencia de la ribera a la erosión y a las fuerzas de tensión. Este método también permite que las partes bajas de la ribera se llenen de vegetación diversa de forma natural, mediante el uso de sedimentos de la quebrada adyacente o de material procedente de la erosión de las piedras. Con el tiempo, esta colonización natural asegura el suelo y crea un sistema de estabilización dinámico que se adapta a los cambios ambientales y aumenta la eficacia del revestimiento rocoso.

En zonas donde se necesita durabilidad a largo plazo y las descargas de diseño son elevadas y suponen una amenaza significativa para la vida o propiedades de gran valor, podría considerarse la siembra deliberada de especies nativas específicas o incluso el uso controlado de especies no

<sup>18</sup> McCullah y Gray, "Medidas de protección de canales y riberas ambientalmente sensibles".

nativas naturalizadas para acelerar la estabilización. Sin embargo, tales decisiones deben tomarse con cautela y considerando los impactos ecológicos junto con la meta principal de fomentar un hábitat ribereño diverso y resistente. Las técnicas vegetativas empleadas en la zona vadosa (el área no saturada por encima de la línea de agua normal) incluyen la superposición de capas de maleza y la sedimentación viva. La superposición de capas de maleza involucra la colocación estratégica de esquejes en el suelo en posición horizontal, inclinados 45 grados hacia atrás, con sus extremos en el medio húmedo para promover el arraigo y el crecimiento. La sedimentación viva aprovecha las propiedades de retención de sedimentos del revestimiento rocoso, en la que se insertan estacas vivas en el sedimento acumulado, lo que refuerza la estructura de la ribera con nueva vegetación.

Los sistemas radiculares de estas plantaciones proporcionan una alfombra que impide la pérdida de finos de la base del suelo subyacente, lo que mejora el drenaje y establece la vegetación ribereña con rapidez. Bajo esta red viva, se coloca una capa de filtro granular nivelado o, en algunos casos, tejido geotextil, para evitar la pérdida de partículas finas del suelo bajo el revestimiento rocoso. Se suele preferir la grava filtrante por su facilidad de instalación y su capacidad para facilitar la penetración de las raíces, a diferencia de la tela geotextil, que puede necesitar modificaciones para adaptarse al crecimiento de las plantas.

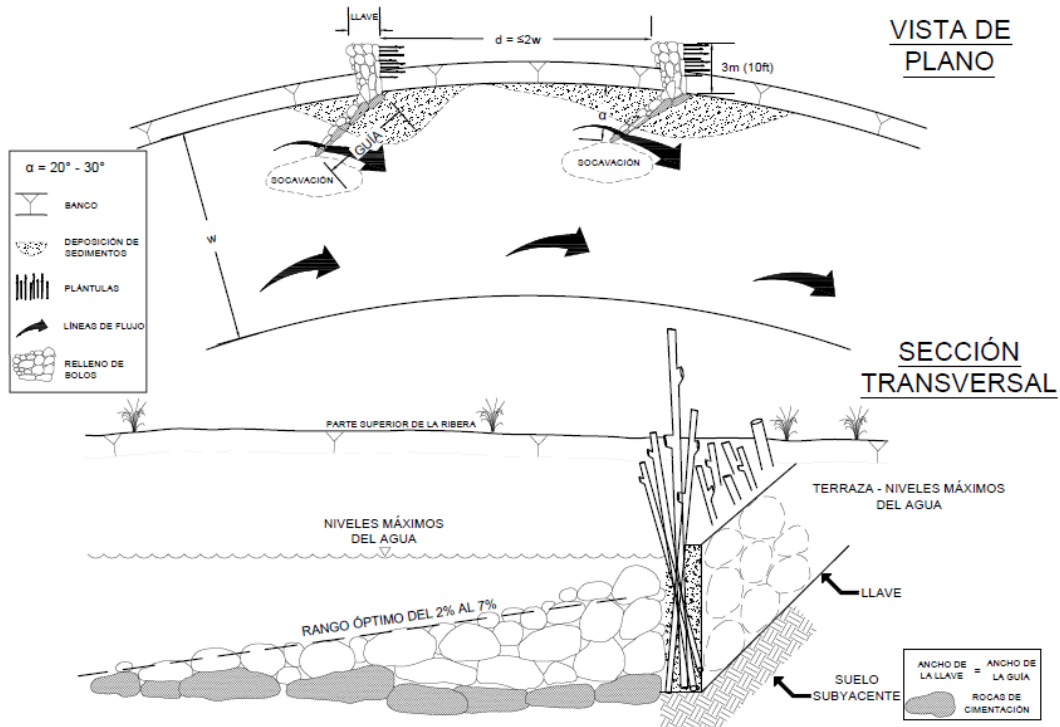
Dentro de la matriz de revestimiento rocoso se han incluido de forma estratégica piedras de lanzamiento automático o de autofiltrantes, elegidas por su capacidad para asentarse en los agujeros de abrasión y rellenarlos de forma natural, lo que refuerza la resistencia del revestimiento a los cambios del nivel del agua entre las marcas AHW y ALW.

El proceso de construcción garantiza que los elementos vegetales se extiendan a lo profundo de la franja capilar, donde las aguas subterráneas ascienden para mantener el suelo constantemente húmedo, y en la zona vadosa superior. Esta ubicación deliberada maximiza el potencial de desarrollo de raíces robustas, lo que a su vez solidifica la estabilización de la ribera y fomenta un próspero hábitat ribereño.

### **Guía de roca con plantaciones**

La Ilustración 2-6 muestra una sección típica de una serie de estructuras angulares colocadas en las quebradas para reducir la erosión y proteger las riberas. Las guías de roca se ilustran tanto en planta (arriba) como en sección transversal (abajo).

## GUÍA DE ROCAS CON PLÁNTULAS



**Ilustración 2-6: Sección típica de guías de roca. Adaptado de McCullah y Gray, 2005.<sup>19</sup>**

La vista en planta del diagrama destaca la ubicación estratégica de las guías de rocas que se extienden en el canal, orientadas río arriba en un ángulo de  $20^\circ$  a  $30^\circ$  desde la ribera. Esta orientación es fundamental porque determina la eficacia de la guía de rocas para redirigir el caudal, reducir la abrasión de la ribera y facilitar la deposición de sedimentos en las zonas seleccionadas. La longitud de las guías de rocas, que suele ser de  $1/4$  a  $1/3$  del ancho total del área en la que se alcanzó el límite de desbordamiento, está diseñada para proporcionar una cobertura suficiente sin estrechar demasiado el canal.

En la sección transversal puede verse la estructura detallada de la guía de rocas y su incorporación a la ribera. La guía de rocas se construye con una zanja excavada en la ribera, que se extiende un mínimo de 3 metros (unos 10 pies) desde la parte superior de la ribera (TOB, por sus siglas en inglés) hasta la marca AHW. Esta zanja es crucial para anclar la estructura y proporcionar estabilidad inmediata al sistema.

La pendiente de la cresta de la paleta está diseñada para permitir el rebase de todos los caudales excepto los más bajos, con una pendiente recomendada del 3% al 7% desde la ribera hacia la base de la guía de rocas. La elevación de la guía de rocas en el extremo de la ribera debe coincidir con los niveles de límite de desbordamiento y de AHW, para asegurar que la estructura funcione de manera eficaz en una serie de condiciones de caudal.

<sup>19</sup> McCullah y Gray, "Medidas de protección de canales y riberas ambientalmente sensibles".



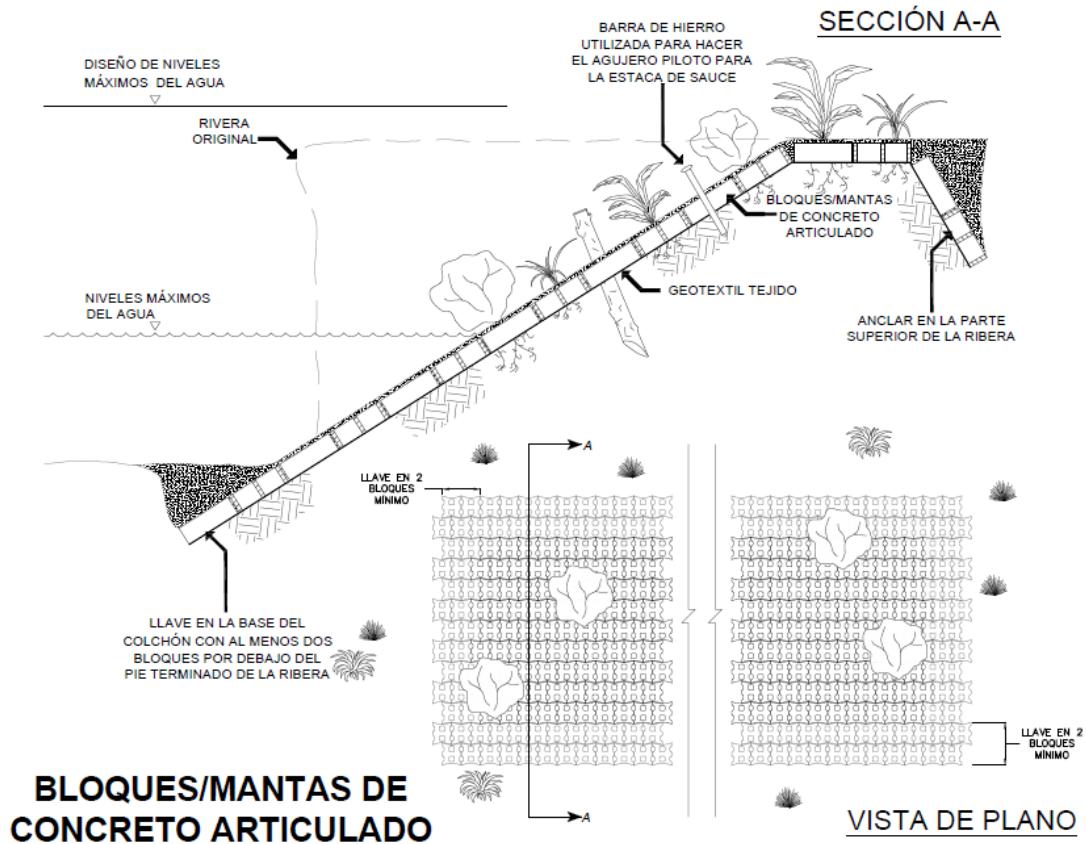
Las rocas empleadas en la construcción se seleccionan con sumo cuidado en función del tamaño y la gradación, y se prefiere la piedra de lanzamiento automático que pueda asentarse en los agujeros de abrasión que se formen, para estabilizar así la base de la ribera de la guía. Estas rocas se colocan sobre el suelo subyacente y forman una estructura fuerte y entrelazada que resiste las fuerzas del agua que fluye. Se pueden utilizar rocas adicionales para proporcionar una base estable, sobre todo en quebradas de cauce arenoso o de grava, donde una mayor profundidad y una ubicación más cercana de las rocas contrarrestan la posible abrasión.

Los espacios entre las paletas son tan cruciales como las propias estructuras. Estos espacios suelen ser el doble del ancho del canal, lo que permite un patrón de caudal natural y evita una turbulencia excesiva que podría provocar una mayor erosión.

La incorporación de plantaciones tiene múltiples propósitos. Aportan beneficios ecológicos, mejoran la estabilidad de la paleta al reforzar el suelo con estructuras radiculares y mejoran el hábitat ribereño. La vegetación se ubica de manera estratégica dentro de la zanja clave y a lo largo de la ribera para aprovechar la disponibilidad de humedad.

### **Bloques de cemento articulados con vegetación**

Los ACB con vegetación, como se muestra en la sección típica de la Ilustración 2-7, son un sistema híbrido de control de la erosión diseñado para zonas sometidas a altas velocidades y fuerza de tensión en las que los métodos de blindaje más blandos no son viables. Estos bloques, interconectados o unidos a un tejido geotextil, ofrecen una protección duradera contra la erosión y pueden integrarse con métodos biotécnicos de plantación.



**Ilustración 2-7: Sección típica de bloques de cemento articulados. La parte superior muestra una vista en sección transversal; la parte inferior es una vista en planta de esa sección transversal. Adaptado de McCullah y Gray, 2005.<sup>20</sup>**

La instalación comienza con la nivelación de la ribera hasta un ángulo estable y la preparación de la ubicación. Se colocan las mantas preensambladas de ACB, cuidando que cada una de ellas quede asegurada en la ribera con un mínimo de dos bloques por debajo del nivel final previsto de la ribera, para asegurar el sistema contra la pérdida de flancos o del subsuelo. Este proceso de fijación asegura los bloques en su posición, lo que proporciona un revestimiento más uniforme y estable capaz de resistir las fuerzas ejercidas por el agua y la acción de las olas.

Para mitigar la posibilidad de que el geotextil restrinja el crecimiento de las raíces, se insertan estacas vivas a través de los bloques y el tejido en el suelo para ayudar a asegurar la penetración de las raíces e iniciar el proceso de establecimiento de la vegetación por encima de la marca AHW, ya que la plantación por debajo de este nivel no sería sostenible. La integración de la vegetación en los ACB es vital tanto por razones ecológicas y estructurales como estéticas: proporciona hábitat, mejora la resistencia del sistema a las fuerzas de elevación y tensión al aumentar la fricción entre los bloques, y suaviza el aspecto de la dura armadura. El anclaje en la parte superior de la ribera y el empleo de un geotextil tejido proporcionan adaptabilidad a la topografía y mejoran la resistencia del sistema.

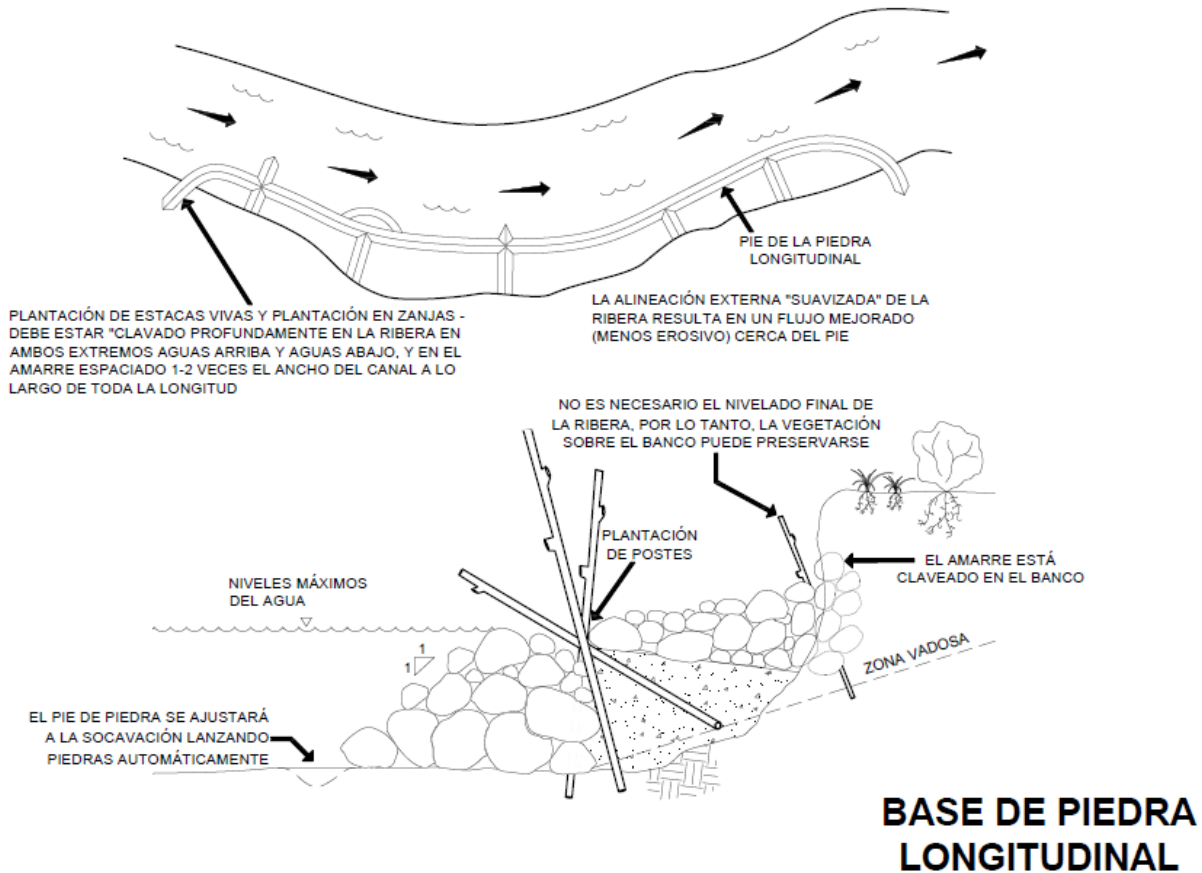
<sup>20</sup> McCullah y Gray, "Medidas de protección de canales y riberas ambientalmente sensibles".

También se recomienda sembrar árboles jóvenes en la parte superior de las riberas. Esta ubicación estratégica no solo mejora la integridad estructural y el valor ecológico de la ribera hasta la marca AHW, sino que también facilita la integración de estos árboles jóvenes en la estructura. Con el tiempo, las raíces de estos árboles crecerán y se entrelazarán aún más con el sistema ACB, lo que fortalecerá la resistencia de la ribera frente a la erosión y las fuerzas de tensión. Este enfoque permite que las partes bajas de la ribera sean recubiertas de forma natural por otra vegetación, lo que llena cada espacio disponible con plantas que utilizan sedimentos de la quebrada adyacente o material procedente de la erosión de las rocas. Este recubrimiento natural ayuda a anclar aún más el suelo, lo que proporciona un sistema de estabilización dinámico que se adapta a los cambios del entorno.

La construcción de ACB con vegetación es una tarea de complejidad moderada que requiere una cuidadosa preparación de los esquejes y de la propia ribera. Sin embargo, una vez instalado, el sistema proporciona una protección sólida al tiempo que permite la incorporación de vegetación. El diseño debe garantizar que los bloques estén bien entrelazados, que se fijen bien y que cada componente vegetal —como hierbas, maleza o esquejes leñosos— se integren de forma adecuada para no obstaculizar la funcionalidad general del sistema de ACB.

### **Protección de base de piedras longitudinal con vegetación**

La Ilustración 2-8 muestra una sección típica para la protección de base de piedras longitudinal. El diagrama detalla una sección transversal de dicha estructura que demuestra su alineación con el nivel AHW, su posicionamiento dentro de la zona vadosa y su integración con plantaciones vivas para la mejora ecológica. La estructura está diseñada para integrarse en las condiciones ecológicas existentes, con la intención de preservar la vegetación de la ribera. Al evitar la nivelación innecesaria o la remodelación de la ribera, la base de piedras longitudinal protege la ribera al tiempo que minimiza el disturbio de la vida vegetal y el hábitat existentes, lo que ofrece una mezcla de defensa estructural y consideración medioambiental.



**Ilustración 2-8: Sección típica de la protección de base de piedras con vegetación. La parte superior muestra una vista en planta; la inferior, una sección transversal. Adaptado de McCullah y Gray, 2005.<sup>21</sup>**

En el núcleo de la base de piedra longitudinal hay una formación de roca nivelada. Esta capa de roca se coloca a lo largo de la base de la ribera paralela a ella, para protegerla de manera eficaz contra la erosión y la socavación. El peso y la disposición de las piedras se estudian detenidamente para garantizar que puedan ajustarse a la abrasión mediante autolanzamiento. La base de piedras no tiene por qué seguir necesariamente la base de la ribera, sino que está diseñada para formar una alineación mejorada o "suavizada" a través de la curva de la quebrada. Esta alineación "suavizada" mejora la dinámica del caudal cerca de la base, lo que reduce la turbulencia y las fuerzas erosivas.

Por encima de la base de piedras, en la zona vadosa (el área del suelo por encima de la capa freática donde el suelo no está saturado de agua), se puede introducir vegetación. Las raíces de estas plantas mejoran la cohesión del suelo y contribuyen a la estabilidad general de la ribera. Estas plantaciones también forman parte de un sistema diseñado para facilitar el establecimiento de un ángulo de ribera estable que será colonizado por la vegetación rápidamente, lo que conducirá a una estabilización a largo plazo.

<sup>21</sup> McCullah y Gray, "Environmentally Sensitive Channel- and Bank-Protection Measures".

Al igual que ocurre con otros métodos estructurales, es fundamental “fijar” la base de piedras. Se trata de incrustar la piedra a gran profundidad en la ribera a intervalos estratégicos a lo largo del sistema de protección para asegurarse de que la base quede bien anclada y resista las fuerzas del agua. Así se evita la socavación de la base de piedras y la consiguiente erosión de la ribera que protege.

El diseño de la base de piedras, ya sea en función de la especificación de peso por unidad de longitud o de una elevación específica de la cresta, es de especial importancia en zonas con un lecho irregular o con evidentes abrasiones profundas para garantizar la capacidad de autolanzamiento de la base. Los beneficios medioambientales, como la creación de hábitats mediante intersticios de piedra y la revegetación, desempeñan un papel crucial en el éxito estructural y ecológico de la base de piedras. El proceso de construcción se lleva a cabo desde río arriba hacia río abajo, lo que minimiza el disturbio de la vegetación de ribera existente.

### 2.2.5. Monitoreo y manejo adaptativo

Para garantizar la eficacia y la longevidad de las medidas estructurales con vegetación, como los revestimientos rocosos, las bases de piedras longitudinales y las guías de rocas, es esencial monitorear periódicamente junto con un manejo adaptativo. Luego de episodios de cambios significativos en el caudal, una inspección visual debería detectar los puntos débiles, los signos de erosión o el desplazamiento de las rocas con evaluaciones anuales a bajo caudal para verificar la estabilidad de estas estructuras. Es fundamental observar cualquier cambio en la morfología del cauce o en las condiciones del hábitat asociados a la instalación y abordar cualquier asunto con plantaciones adicionales o ajustes estructurales. Llevar un registro detallado de las inspecciones y las intervenciones es fundamental para hacer un seguimiento de la salud de estas medidas y permitir la toma de decisiones informadas para la protección continua de las riberas y la integridad ecológica.

### 2.2.6. Estimaciones de costos

Las estimaciones de costos para las medidas estructurales con vegetación se enumeran en la Tabla 2-6.

**Tabla 2-6: Estimaciones de costos para las medidas estructurales con vegetación**

Sección típica	Costo
Perforación y explosión de piedras, excavadora de 300 HP, de 0.5 CY a 1 CY, acarreo de 300', sepultura de piedras en la ubicación.	\$13.60 por CY
Excavación, medida de ribera a granel, capacidad de 3 CY = 260 CY/hora, retroexcavadora, hidráulica, brazo de cadena, excepto carga de camión.	\$1.78 por CY
Alquiler de excavadora diésel hidráulica con brazo de cadena de 7 CY de capacidad, incl. costo de operación por hora.	\$1,580.06 por día
Revestimiento rocoso y franjas de rocas	\$48.83 por tonelada

Sección típica	Costo
Hierba de raíces profundas.	\$5.22 cada una
Preparación de los lechos de plantación, relleno de la fosa de plantación, tierra vegetal en la ubicación, a mano.	\$57.17 por hora
Malla de fibra de coco/yute.	\$1.11 por CY

CY = yarda cúbica; HP = caballos de fuerza

## 2.3. Barricadas de troncos diseñados

### 2.3.1. Descripción de soluciones y objetivos

Las barricadas de troncos diseñados (ELJ, por sus siglas en inglés), también conocidos como barreras de escombros, compuestos de restos leñosos y deflectores de restos leñosos, utilizan escombros leñosos de gran tamaño (LWD, por sus siglas en inglés) en el cauce para imitar los sistemas naturales para la formación de ríos y la restauración de quebradas. Su objetivo es redirigir, desviar o disipar los flujos erosivos, lo que mejora la estabilización de las riberas y el hábitat acuático mediante la creación de complejidad estructural e hidráulica. Los ELJ están diseñados para favorecer la formación de charcas, la cobertura de la quebrada y la diversidad de hábitats, a la vez que atienden el declive histórico de los LWD en las quebradas debido a diversas actividades antropogénicas.

Entre las medidas clave de ELJ recomendadas para una estabilización eficaz de las riberas se incluyen:

- **Estructuras de troncos y raíces:** utilizar troncos grandes con raíces adheridas, ubicados de forma estratégica para imitar las acumulaciones de escombros naturales. Estas estructuras absorben y disipan la energía del flujo de agua, protegen las riberas de la erosión y proporcionan hábitats para peces y otros organismos acuáticos.
- **Estructuras de troncos con vegetación:** incorporar esquejes vivos o árboles jóvenes de especies vegetales nativas en la construcción de bloqueos de troncos. Esta técnica fomenta el crecimiento de la vegetación directamente sobre los troncos, lo que mejora la estabilidad y el valor ecológico de la estructura con el paso del tiempo.
- **Estructuras integradas de guías de troncos:** construir guías a partir de troncos colocados en la quebrada para redirigir el caudal lejos de las riberas vulnerables. Añadir vegetación a estas estructuras estabiliza aún más la ribera y ofrece un hábitat adicional.

Aunque los ELJ ofrecen beneficios significativos para la restauración de las quebradas, también presentan retos que requieren una cuidadosa planificación y ejecución para mitigarlos. Estas estructuras pueden fallar, desprenderse o ser socavadas por corrientes de agua extremas si no se aseguran de forma adecuada. Por lo tanto, es fundamental garantizar un anclaje sólido. Los ELJ deben incrustarse a fondo en el cauce con sistemas de anclaje adecuados para resistir las presiones hidráulicas de los distintos regímenes de caudal. Esto involucra el uso tanto de fijaciones mecánicas como de pesos naturales procedentes de la acumulación de sedimentos. Para mantener la funcionalidad y la integridad de los ELJ, son cruciales las inspecciones y el mantenimiento periódicos. Esto incluye comprobar si hay signos de movimiento, desprendimiento o debilitamiento estructural, sobre todo luego de caudales importantes, y realizar los ajustes o refuerzos necesarios.

### 2.3.2. Entornos adecuados para una implementación exitosa

Los ELJ son más eficaces en entornos que históricamente contenían grandes escombros leñosos. Son aplicables en una amplia gama de contextos hidrológicos y geomórficos, tanto en contextos de resistencia como de redirección, y pueden diseñarse para secciones específicas de la quebrada, como las zonas dentro de la quebrada, en la base, a mitad de la ribera y en la parte superior de la ribera. Las ubicaciones adecuadas suelen presentar distintos regímenes de caudal, desde tramos lentos a otros con velocidades moderadas, en los que los ELJ pueden soportar presiones hidráulicas sin un mantenimiento significativo.

Estas estructuras son adecuadas para:

- **Quebradas pequeñas, rurales y silvestres:** donde preservar o mejorar el carácter natural es una prioridad y la interferencia humana es mínima.
- **Quebradas intermitentes:** para hacer frente a la erosión del canal y mejorar la calidad del agua y la biodiversidad en quebradas intermitentes, siempre que el caudal no sea significativo o lo suficientemente fuerte como para desalojar los troncos. Los troncos desalojados pueden obstruir el caudal río abajo, sobre todo si quedan atascados en las alcantarillas y entre los pilotes y columnas de los puentes.
- **Paisajes agrícolas:** reducir la erosión de las riberas y mejorar la calidad del agua mediante la filtración de la escorrentía.

Antes de implementar los ELJ, especialmente en vías fluviales urbanas, es crucial realizar un estudio hidráulico exhaustivo. Esto involucra la determinación del tipo, del tamaño, de la posición y del espaciado adecuados, adaptando las estructuras ELJ a las condiciones específicas de la ubicación y a los objetivos del proyecto. Este estudio garantiza que la ubicación de estos voluminosos materiales no provoque impactos adversos, como el aumento de las inundaciones, que es motivo de especial preocupación en zonas muy pobladas o urbanizadas. Comprender las posibles repercusiones hidráulicas es esencial para evitar que se agraven los retos establecidos de manejo del agua y para garantizar el éxito y la sostenibilidad a largo plazo de estas instalaciones.

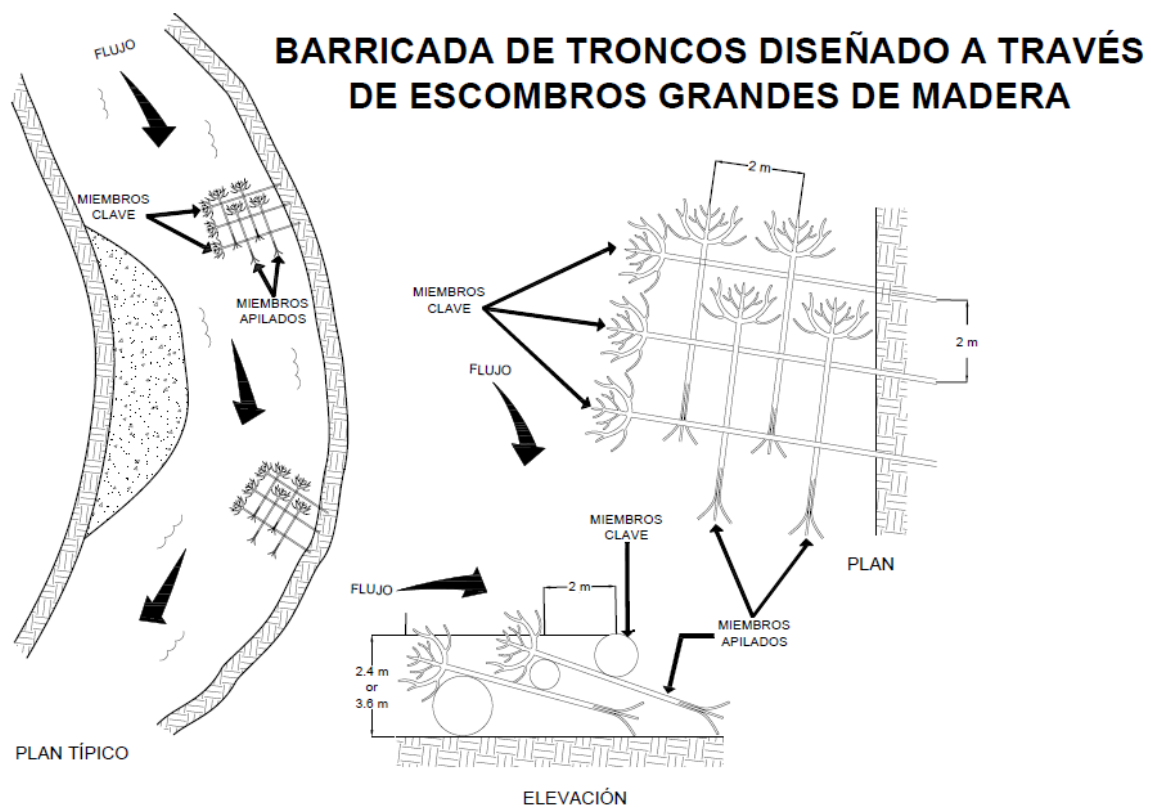
### 2.3.3. Materiales y equipos de construcción

La construcción de los ELJ utiliza en su mayor parte materiales naturales y de origen local, para destacar la adaptación a las condiciones hidrológicas y ecológicas locales:

- **Troncos y raíces:** la columna vertebral de los ELJ, seleccionados por su tamaño, durabilidad y adaptabilidad a las condiciones específicas de la ubicación. Estos materiales a menudo se obtienen de actividades locales de eliminación de árboles para minimizar el impacto ambiental.
- **Vegetación nativa:** incluye plantas ribereñas conocidas por la resistencia de sus raíces y su adaptabilidad a las condiciones locales. Estas especies se integran en las estructuras de troncos para proporcionar estabilización adicional y beneficios ecológicos.
- **Sistemas de anclaje:** para asegurar los troncos y las raíces en su lugar.
- **Equipo de instalación:** suele requerir maquinaria pesada para mover y colocar grandes troncos y raíces, además de herramientas más pequeñas para plantar y mantener segura la vegetación.

### 2.3.4. Secciones típicas

El diseño típico de un ELJ mediante LWD integra elementos clave y elementos enrejados para estabilizar las riberas y mejorar los hábitats acuáticos (Ilustración 2-9). Los elementos clave se instalan en paralelo al caudal de la quebrada y actúan como soportes estructurales principales. Suelen ser troncos o maderos de mayor tamaño que se anclan en el cauce y forman la columna vertebral de los ELJ. Perpendicular al caudal de la quebrada, los elementos enrejados se colocan para capturar y acumular escombros y sedimentos. Esta característica del diseño sirve para aumentar la complejidad estructural de los ELJ y favorece la deposición de sedimentos, que es crucial para la estabilidad de los ELJ.



**Ilustración 2-9: Sección típica de un ELJ a través de LWB. La parte izquierda muestra la orientación típica en la quebrada en vista en planta, la parte superior derecha muestra una configuración ampliada de los LWD y la parte inferior muestra una vista en sección transversal. Adaptado de McCullah y Gray, 2005.<sup>22</sup>**

La vista aérea en planta de un diseño típico en la Ilustración 2-9 muestra el espaciado estratégico

<sup>22</sup> McCullah y Gray, "Environmentally Sensitive Channel- and Bank-Protection Measures".



entre los elementos clave y los miembros enrejados. Este espaciado específico de 2x2 metros es fundamental para la funcionalidad del diseño, ya que permite controlar el caudal de agua y la acumulación estratégica de sedimentos y materia orgánica. Esta acumulación es esencial para crear charcas y hábitats variados que sustenten una vida acuática diversa. La vista transversal de la Ilustración 2-9 detalla cómo los elementos clave se colocan a una profundidad de 2 a 3 metros, lo que permite al ELJ interactuar de manera eficaz con el agua a diferentes niveles y adaptarse a una gama de condiciones de caudal de bajo a alto. Esto es de gran importancia para adaptarse a los niveles de agua fluctuantes y garantizar que el ELJ siga funcionando durante los distintos caudales estacionales y fenómenos meteorológicos.

La vegetación es una parte integral del diseño de ELJ. Las plantaciones de especies nativas aportan beneficios ecológicos, como sistemas radiculares que estabilizan aún más las riberas y ofrecen un hábitat para la fauna. Además, estas plantaciones pueden contribuir a la salud general del ecosistema de la quebrada, pues mejoran la calidad del agua y proporcionan una cobertura para los peces.

El diseño también debe tener en cuenta el caudal natural de la quebrada y alinear el ELJ con la dirección del caudal para que trabaje en armonía con el movimiento direccional del río o la quebrada. Esta consideración es esencial para la eficacia del ELJ a la hora de redirigir las fuerzas erosivas y modelar la deposición de sedimentos.

### **2.3.5. Monitoreo y manejo adaptativo**

El monitoreo efectivo y el manejo adaptativo son cruciales para mantener la funcionalidad y el éxito a largo plazo de los ELJ. El monitoreo debe realizarse cada año y luego de eventos hidrológicos significativos o cambios estacionales importantes (por ejemplo, la temporada de huracanes) que puedan afectar a la estabilidad de los ELJ.

Las principales actividades de control incluyen corroborar la integridad estructural de la estabilidad y el estado de los troncos, las raíces y los sistemas de anclaje, vigilando señales de movimiento o degradación; evaluar el crecimiento y la salud de la vegetación que forma parte integral de la estabilidad y la función ecológica de los ELJ; y monitorear la presencia y actividad de las especies acuáticas para medir el impacto ecológico de los ELJ. Además, los patrones de deposición de sedimentos y erosión en torno a los ELJ deben ser revisados para evaluar su eficacia a la hora de promover la acumulación en las riberas y la complejidad del hábitat.

Las estrategias de manejo adaptativo pueden integrar el ajuste de la posición de los troncos o la mejora de los mecanismos de anclaje si se producen desplazamientos o asentamientos, la suplementación o replantación de la vegetación para garantizar una cobertura y un crecimiento robustos, y la reparación o sustitución de las partes dañadas de los ELJ para garantizar una funcionalidad continuada.

### **2.3.6. Estimaciones de costos**

Las estimaciones de costos de los ELJ se enumeran en la Tabla 2-7.

**Tabla 2-7: Estimaciones de costos para barricadas de troncos**

Sección típica	Costo
Excavación, medida de ribera a granel, capacidad de 3 CY = 260 CY/hora, retroexcavadora, hidráulica, brazo de cadena, excepto carga de camión.	\$1.78 por CY
Estaca viva	\$2.50 por estaca
Escombros leñosos	El costo de los escombros leñosos de gran tamaño puede variar mucho, desde la madera recuperada en la zona, que es gratuita, hasta los árboles enteros de gran diámetro, que tal vez haya que serrar para transportarlos y volver a ensamblarlos después. Los escombros leñosos de gran tamaño pueden variar entre unos cientos de dólares y mil dólares por pieza.

CY = yarda cúbica

## 2.4. Aspectos reglamentarios

En Puerto Rico, las intervenciones en las riberas y los ríos están reguladas por leyes específicas destinadas a equilibrar la conservación del medioambiente con las necesidades de desarrollo. La Ley de Aguas de Puerto Rico (Ley Núm. 136 de 3 de junio de 1976, según enmendada) delega al Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) la autoridad para planificar, regular y gestionar el uso, la conservación y el desarrollo de los recursos hídricos del archipiélago, y proporciona orientaciones técnicas esenciales para el manejo fluvial.<sup>23</sup>

Otros reglamentos importantes son el Plan Integral de Recursos de Aguas (PIRA), que describe los usos actuales y futuros de los cuerpos de agua en consonancia con las necesidades de los sistemas naturales, sociales y económicos de Puerto Rico.<sup>24</sup> Además, la Ley Núm. 49 del 3 de enero de 2003, según enmendada, establece la política pública de conservación de ríos y quebradas y fija los estándares para el control de inundaciones y la designación de franjas verdes de uso público.<sup>25</sup> El Reglamento Núm. 13 de la Junta de Planificación adopta las definiciones de zonas inundables de FEMA para regular el uso de terrenos inundables, con el fin de evitar la construcción en zonas de alto riesgo.<sup>26</sup>

Para las actividades que impliquen el depósito o dragado de material en aguas estadounidenses, se requiere un permiso del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en virtud del Título 33 del Código de Reglamentos Federales (CFR, por sus siglas en inglés), Parte 323; Permisos de vertido de material de dragado o relleno en aguas estadounidenses.<sup>27</sup>

<sup>23</sup> Gobierno de Puerto Rico, Oficina del Gobernador y Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, “Puerto Rico Water Quality Standards Regulation”.

<sup>24</sup> Gobierno de Puerto Rico, Oficina del Gobernador y Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, “Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico”.

<sup>25</sup> Gobierno de Puerto Rico, Oficina del Gobernador y Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, “Puerto Rico Water Quality Standards Regulation”.

<sup>26</sup> Gobierno de Puerto Rico, Oficina del Gobernador y la Junta de Planificación de Puerto Rico.

<sup>27</sup> Oficina del Registro Federal, “33 CFR 323 – Permits for Discharges of Dredged or Fill Material into Waters of the United

### 3. Casos de estudio

#### 3.1. Restauración de Río Loco (Guánica, Puerto Rico)

En cumplimiento de las directrices estratégicas establecidas por el Plan de Manejo de la Cuenca Hidrográfica de la Bahía de Guánica (Guánica Bay Watershed Management Plan) de 2008, el Centro de Protección de Cuencas Hidrográficas de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) llevó a cabo un estudio inicial para el Programa de Conservación de Arrecifes de Coral junto con el DRNA de Puerto Rico, lo que marcó un hito significativo en los esfuerzos de manejo y conservación de cuencas hidrográficas en la región.<sup>28</sup> La cuenca hidrográfica de la bahía de Guánica fue la primera cuenca de drenaje designada como prioritaria por el Grupo de Trabajo de Arrecifes de Coral de Estados Unidos (US Coral Reef Task Force), un grupo de trabajo de 13 agencias federales, lo que subraya su importancia crítica para la protección de los arrecifes de coral. En este papel fundamental, el Programa de Conservación de Arrecifes de Coral de la NOAA financió a la organización no gubernamental Protectores de Cuencas, Inc. (PDC) para que actuara como gerentes de la cuenca y liderara las acciones sobre el terreno para restaurar y estabilizar las riberas a lo largo del río Loco mediante el uso de SNBN.

El estudio de 2008 representó un esfuerzo de colaboración que reunió las opiniones de expertos locales, personal del gobierno federal de agencias como la NOAA, el Servicio Geológico de Estados Unidos, el DRNA, el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)/Servicio de Conservación de Recursos Naturales y académicos de la Universidad de Puerto Rico, junto con la comunidad local. Este equipo multidisciplinario evaluó la condición de la cuenca e identificó acciones clave de manejo dirigidas a mitigar la sedimentación, mejorar la calidad del agua, aumentar la estabilidad de las riberas y restaurar los hábitats naturales mediante un extenso trabajo de campo. La designación de la cuenca de la bahía de Guánica como una prioridad por el Grupo de Trabajo sobre Arrecifes de Coral de EE. UU. (US Coral Reef Task Force) y la intervención del PDC en el manejo de la cuenca resaltan el compromiso nacional y local de conservar los ecosistemas marinos y terrestres de Puerto Rico.



**Ilustración 3-1: Hidroslembra en las riberas del canal río Loco. (Crédito de la foto: PDC)**

Las estrategias de bioingeniería de PDC se apartaron de los enfoques convencionales de ingeniería dura y, en su lugar, optaron por soluciones sostenibles y ecológicas.<sup>29</sup> Una de las intervenciones

---

States”.

<sup>28</sup> Centro de Protección de Cuencas Hidrográficas, “Guánica Bay Watershed Management Plan: A Pilot Project for Watershed Planning in Puerto Rico”.

<sup>29</sup> Viqueira Ríos, “Implementation of the Guánica Bay Watershed Management Plan”.

más destacadas fue la aplicación de hidrosiembra en las ubicaciones de restauración, una técnica que consiste en rociar una mezcla de semillas, viruta y estabilizadores del suelo con el fin de establecer en poco tiempo una cobertura vegetal que combata la erosión y mejore la protección ribereña (Ilustración 3-1). Además de las estrategias centradas en la vegetación, el proyecto abordó asuntos estructurales que contribuían a la degradación del hábitat y a la inestabilidad de la quebrada. La eliminación de infraestructuras de riego obsoletas y abandonadas en el interior del río fue un paso fundamental para restablecer los patrones naturales de caudal y reducir la acumulación de sedimentos. Dicha acción ayuda a mitigar los riesgos de inundación y erosión, y contribuye a mejorar la salud ecológica general del sistema fluvial (Ilustración 3-2).



**Ilustración 3-2: Ubicaciones de eliminación de escombros a lo largo de río Loco. (Crédito de la foto: PDC)**

Las charcas de retención de sedimentos fueron otro elemento clave del proyecto de restauración de río Loco. Diseñadas para atrapar y retener los sedimentos antes de que la corriente los arrastre río abajo, estas charcas de retención también sirven de amortiguador y protegen el río de la sedimentación excesiva; uno de los principales colaboradores en la mala calidad del agua y la degradación del hábitat.

El acondicionamiento de las infraestructuras de riego establecidas en las llanuras aluviales de río Loco, en colaboración con el Departamento de Agricultura de Puerto Rico, ilustró un acercamiento holístico del manejo de las cuencas. Al mejorar las prácticas de manejo del agua, el proyecto estaba dirigido a reducir las fuerzas erosivas que actúan sobre las riberas del río para estabilizar aún más la zona y evitar el transporte de sedimentos.

Estas acciones resaltan el compromiso del proyecto en el uso de las SBN para la estabilización de riberas y el manejo de cuencas. Mediante una combinación de técnicas de bioingeniería, promoción de la vegetación y ajustes estructurales, el proyecto de restauración de río Loco no solo estaba dirigido a la estabilización inmediata de las riberas, sino también a fomentar la resiliencia y la sostenibilidad a largo plazo en la cuenca de la bahía de Guánica. Esta iniciativa evidencia la eficacia de integrar soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a complejos retos ambientales.

### **3.2. Proyecto de estabilización de las paletas de riberas del río Canóvanas (Canóvanas, Puerto Rico)**

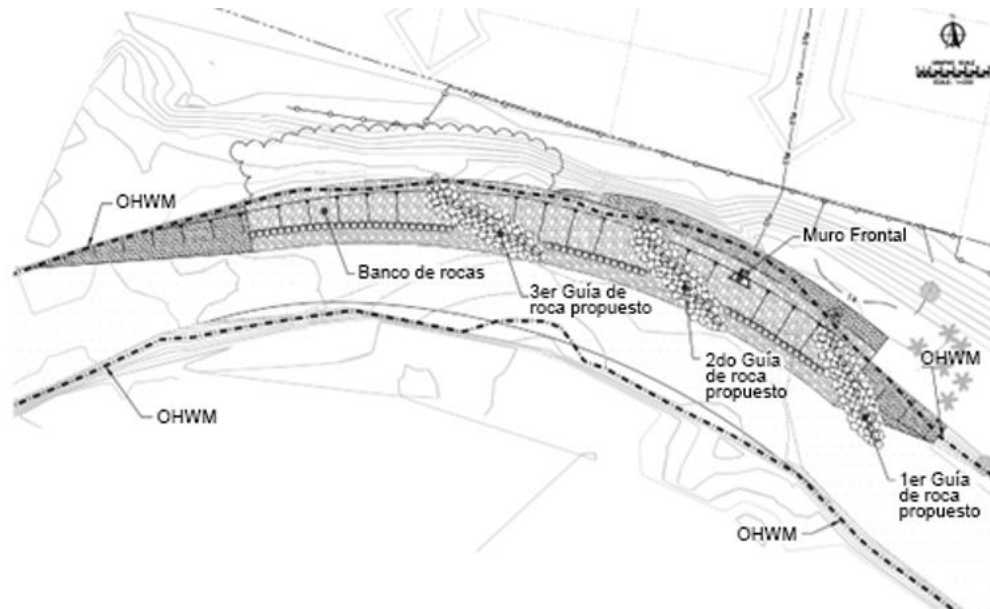
Gregory L. Morris Engineering COOP (GLM) desarrolló e implementó técnicas de estabilización de las riberas para un segmento del río Canóvanas, con el fin de evitar la abrasión que amenazaba varias estructuras residenciales en la comunidad de River Gardens en Canóvanas (Ilustración 3-3).

El proyecto utilizó varias medidas de estabilización estructural con vegetación para controlar la erosión de las riberas. El diseño elegido involucró la construcción de un banco y guías de rocas y la reubicación del canal *thalweg*. El banco de roca, ubicado a lo largo del antiguo segmento vertical de la ribera derecha del río, se diseñó con la cresta a nivel de límite de desbordamiento para proporcionar un punto de anclaje para las guías de rocas. Las mismas se instalaron para reorientar las corrientes erosivas hacia el centro del canal, una estrategia para proteger la ribera vulnerable de una mayor degradación.

La piedra, a diferencia de otros materiales utilizados normalmente en Puerto Rico como los gaviones, las tablestacas y el cemento, resultó ser la mejor opción debido a su durabilidad y a su impacto menos perjudicial en el medioambiente. Esto debido a que facilita la revegetación y reduce la velocidad del caudal cerca de la ribera. A pesar de las alteraciones ambientales inherentes a la construcción, se consideró que el uso de piedra era el más ventajoso para balancear la longevidad y minimizar el disturbio ecológico.

GLM destaca que una restricción importante del proyecto era una presa cercana de toma de agua no tratada que acumula sedimentos y sirve para controlar la nivelación de la pendiente del río Canóvanas. Esta característica fue crucial a la hora de definir el enfoque del diseño y hubo que tenerla en cuenta para evitar que bajaran las elevaciones del lecho del río.

La incorporación de vegetación en las guías de rocas proporcionó beneficios adicionales más allá de la estabilización estructural. La siembra de especies nativas en estas estructuras no solo contribuyó a reducir la erosión al reforzar el suelo, sino que también mejoró la diversidad del hábitat y la calidad del agua mediante procesos naturales de filtración. Al aprovechar la protección combinada que ofrecen los elementos estructurales y vegetales, proyectos como este pueden lograr un balance más sostenible entre las necesidades humanas y la integridad medioambiental. Los proyectos futuros podrían beneficiarse de considerar tales integraciones desde el principio, lo que asegura que los esfuerzos para proteger la infraestructura y la propiedad también contribuyan a la restauración y preservación de los ecosistemas fluviales naturales. No obstante, el énfasis del proyecto en minimizar el impacto ambiental durante la selección de los métodos de estabilización pone de relieve un movimiento consciente hacia prácticas más sostenibles. El éxito de un proyecto de este tipo no se mide solo por las evaluaciones inmediatas posteriores a la construcción; por tanto, el monitoreo continuo es esencial para evaluar la eficacia continua del proyecto. El seguimiento de los cambios geomorfológicos y topográficos servirá para realizar los ajustes necesarios y garantizar la estabilidad e integridad de las riberas del río en la comunidad residencial de River Gardens.



**Ilustración 3-3: La alternativa elegida para la estabilización del río Canóvanas, cuyo diseño involucraba la construcción de un banco y guías de roca, y la reubicación del canal *thalweg*.**

## 4. Referencias

- Center for Watershed Protection. “Guánica Bay Watershed Management Plan: A Pilot Project for Watershed Planning in Puerto Rico.” 2008. Prepared for the NOAA Coral Reef Program and DNER. Ellicott City, MD. 39 p. [https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2020/12/Guanica\\_Watershed\\_Management\\_Plan\\_Final.pdf](https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2020/12/Guanica_Watershed_Management_Plan_Final.pdf).
- Eubanks, C.E., and D. Meadows. *A Soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization*. U.S. Department of Agriculture Forest Service, n.d.
- Fischenich, Craig. “Stability Thresholds for Stream Restoration Materials.” Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center, 2001. <https://www.marincounty.org/-/media/files/departments/pw/mcstoppp/residents/fischenichstabilitythresholds.pdf>.
- Government of Puerto Rico, Office of the Governor. Puerto Rico Water Quality Standards Regulation, Pub. L. No. Law No. 416-2004, 98 (2022).
- Government of Puerto Rico, Office of the Governor, and Department of Natural and Environmental Resources. Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico (2016). <https://drna.pr.gov/wp-content/uploads/formidable/PIRA-2016.pdf>.
- McCullah, John, and Donald Gray. *Environmentally Sensitive Channel- and Bank-Protection Measures*. NCHRP Report 544. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Academies, 2005. <https://doi.org/10.17226/13556>.
- Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration. “33 CFR 323 – Permits for Discharges of Dredged or Fill Material into Waters of the United States.” Government.govinfo.gov. Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration, July 1, 2023. <https://www.govinfo.gov/app/details/CFR-2023-title33-vol3/https%3A%2F%2Fwww.govinfo.gov%2Fapp%2Fdetails%2FCFR-2023-title33-vol3%2FCFR-2023-title33-vol3-part323>.
- Strum, Paul. “Guánica Hydroseeding, 2014,” 2014. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/10195>.
- Urban Hydrologics. “Recomendación de Plantas para la Estabilización de Riberas en Ríos y Quebradas de PR (Plant Recommendation for Riverbank Stabilization)”. 2024. Ríos y Quebradas - Puerto Rico - Soluciones Basadas en la Naturaleza. 7 p.
- U.S. Army Corps of Engineers. “National Wetland Plant List,” 2020. [https://cwbi-app.sec.usace.army.mil/nwpl\\_static/v34/home/home.html](https://cwbi-app.sec.usace.army.mil/nwpl_static/v34/home/home.html).
- U.S. Department of Commerce, NOAA. “High Water Level Terminology.” NOAA’s National Weather Service. Consultado el 20 de marzo de 2024. <https://www.weather.gov/aprhc/terminology>.

USDA Forest Service, US Fish and Wildlife Service, Puerto Rico Department of Natural and Environmental Resources and EnviroSurvey, Inc. “Guía de Árboles Nativos para Prácticas de Conservación en Puerto Rico e Islas Vírgenes Americanas / Guide to Native Trees for Conservation Practices in Puerto Rico and the US Virgin Islands,” 2022.  
<https://guiadearboles.org/>.

“USDA Plants Database.” Consultado el 20 de marzo de 2024. <https://plants.usda.gov/>.

Viqueira Ríos, R.A. “Implementation of the Guánica Bay Watershed Management Plan.” Yauco, Puerto Rico: Protectores de Cuencas, 2018.  
[https://www.ncei.noaa.gov/data/oceans/coris/library/NOAA/CRCP/NOS/OCM/Projects/397/ViqueiraRios2018\\_Guanica\\_Watershed\\_Management\\_Implementation.pdf](https://www.ncei.noaa.gov/data/oceans/coris/library/NOAA/CRCP/NOS/OCM/Projects/397/ViqueiraRios2018_Guanica_Watershed_Management_Implementation.pdf).

## 4.1. Recursos

Axelrod, F. S. (2011). A Systematic Vademecum to the Vascular Plants of Puerto Rico. BRIT Press. 428 p.

Department of Natural and Environmental Resources [DNER]. (2016). Guía para mantener la conectividad ecológica en las estructuras de cruce en ríos y quebradas de Puerto Rico (Guide for Maintaining the Ecological Connectivity Along River and Creek Crossings in Puerto Rico). 31 p. Disponible en: <https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/formidable/Gu%C3%ADa-para-mantener-la-conectividad-ecol%C3%B3gica-en-las-estructuras-de-cruce-en-r%C3%ADos-y-quebradas-de-Puerto-Rico.pdf>.

DNER. (2016). Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico. Disponible en: <https://drna.pr.gov/wp-content/uploads/formidable/PIRA-2016.pdf>.

DNER. (2022). Puerto Rico Water Quality Standards Regulation, Pub. L. No. Law No. 416-2004, 98 (2022). Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-12/documents/prwqs.pdf>.

Doll, B. A., Grabow, G. L., Hall, K. R., Halley, J., Harman, W. A., Jennings, G. D., Wise, D. E. (2003). Stream restoration: a natural channel design handbook. North Carolina Stream Restoration Institute and North Carolina Sea Grant. 82 p. Disponible en: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/36133>.

Eubanks, C.E., and D. Meadows. (2002). A Soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization. U.S. Department of Agriculture Forest Service. FS-683. 187 p. Disponible en: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=umn.31951d022485889&seq=1>.

Federal Interagency Stream Restoration Working Group. (1998). Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. Disponible en: <https://www3.uwsp.edu/cnr-ap/UWEXLakes/PublishingImages/resources/restoration-project/StreamRestorationHandbook.pdf> (637 pages).



- FEMA. (2021). Building Communities Resilience with Nature Based Solutions - A Guide for Local Communities: [https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema\\_riskmap-nature-based-solutions-guide\\_2021.pdf](https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_riskmap-nature-based-solutions-guide_2021.pdf).
- FEMA. (2023). Building Community Resilience with Nature-Based Solutions - Strategies for Success: [https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema\\_nature-based-solutions-guide-2-strategies-success\\_2023.pdf](https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_nature-based-solutions-guide-2-strategies-success_2023.pdf).
- Fischenich, Craig. (2001). "Stability Thresholds for Stream Restoration Materials." Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center. <https://www.marincounty.org/-/media/files/departments/pw/mcstoppp/residents/fischenichstabilitythresholds.pdf>.
- Government of Puerto Rico, Office of the Governor, & Puerto Rico Planning Board. Flood Hazard Zone Regulation (Planning Regulation No. 13). 59 (2001).
- Harman, W., R. Starr. (2011). Natural Channel Design Review Checklist. US Fish and Wildlife Service, Chesapeake Bay Field Office, Annapolis, MD and US Environmental Protection Agency, Office of Wetlands, Oceans, and Watersheds, Wetlands Division. Washington, D.C. EPA 843-B-12-005. 96 p. Disponible en: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/ncd\\_review\\_checklist.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/ncd_review_checklist.pdf).
- Iowa's Department of Natural Resources. (2018). Iowa's River Restoration Toolbox for Best Management Practices. Disponible en: <https://www.iowadnr.gov/Environmental-Protection/Water-Quality/River-Restoration/River-Restoration-Toolbox>.
- Lugo, A.E., García-Martinó, A., Quiñones-Márquez, F. (2011). La Cartilla del Agua. Acta Científica. Vol. 25(1-3): 138 p. Disponible en: <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/44177>.
- Más, E. G. y O. García-Molinari. (2006). Guía Ilustrada de Yerbas Comunes en Puerto Rico/Illustrated Guide on the Common Grasses in Puerto Rico. 2da. Edición Ampliada y Revisada/2nd. Revised Edition. Universidad de Puerto Rico, University of Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez/Mayagüez Campus. USDA Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Natural Resources Conservation Service. Área del Caribe/Caribbean Area. 312 p. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/guia-ilustrada-de-yerbas-comunes-en-puerto-rico>.
- Más, E. G. & M. de L. Lugo-Torres. 2013. Malezas Comunes en Puerto Rico e Islas Vírgenes Americanas/Common Weeds in Puerto Rico & U.S. Virgin Islands. Universidad de Puerto Rico, University of Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez/Mayagüez Campus. USDA Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Natural Resources Conservation Service. Área del Caribe/Caribbean Area. 395 p. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/plant-materials/common-weedsmalezas-comunes>.

- McCullah, John, and Donald Gray. Environmentally Sensitive Channel- and Bank-Protection Measures. NCHRP Report 544. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Academies, 2005. <https://doi.org/10.17226/13556>.
- Morris, L. G., Portalatín, J., de Jesús, R., Ramos, M., and T. Toledo. (2010). Guía para el Manejo de los Ríos de Puerto Rico. 143 pp. Disponible en: <https://www.drna.pr.gov/documentos/guia-para-el-manejo-de-rios-en-puerto-rico-2/>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2024). High Water Level Terminology. US Department of Commerce National Weather Service. Consultado el 20 de marzo de 2024. <https://www.weather.gov/aprfc/terminology>.
- Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration. “33 CFR 323 - PERMITS FOR DISCHARGES OF DREDGED OR FILL MATERIAL INTO WATERS OF THE UNITED STATES.” Government. govinfo.gov. Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration, July 1, 2023. <https://www.govinfo.gov/app/details/CFR-2023-title33-vol3/CFR-2023-title33-vol3-part323>.
- Office of the President. (2023). Nature-based Solutions Resource Guide 2.0 (Compendium of Federal Examples, Guidance, Resource Documents, Tools and Technical Assistance). 70 p. Disponible en: <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2023/12/09/nature-based-solutions-resource-guide-2-0/>.
- Para La Naturaleza. (n.d.). Guía digital de árboles nativos de Puerto Rico: <https://www.paralanaturaleza.org/para-la-naturaleza-presenta-nueva-guia-digital-de-arboles-nativos-de-puerto-rico/>.
- Rojas-Sandoval, J., & Acevedo, P. (2015). Naturalization and invasion of alien plants in Puerto Rico and the Virgin Islands. *Biological Invasions*. 17. 10.1007/s10530-014-0712-3. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10530-014-0712-3>.
- Rosgen, D. (1996). *Applied River Morphology*. 2nd edition. Pagosa Springs, Colo: Wildland Hydrology, 1996.
- Strum, Paul. “Guánica Hydroseeding, 2014,” 2014. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/10195>.
- Terrasa-Soler, J. J. (2016). Recommended Species for Rain Gardens, Bioswales, and Bioretention Cells in Puerto Rico and the Caribbean Islands. San Juan, Puerto Rico: The Office of Marvel & Marchand Architects. 15 p. Disponible en: <https://jterrasa.wordpress.com/2016/02/05/recommended-species-for-green-infrastructure-in-the-caribbean/>.
- The Federal Interagency Stream Restoration Working Group. (2001). *Stream Corridor Restoration Guidebook (Principles, Processes and Practices)*. 637 p. Disponible en:

<https://www3.uwsp.edu/cnr-ap/UWEXLakes/PublishingImages/resources/restoration-project/StreamRestorationHandbook.pdf>.

The Nature Conservancy & AECOM. (2021). Promoting Nature-based Hazard Mitigation Through FEMA Mitigation Grants. 57 p. Disponible en: <https://www.fema.gov/emergency-managers/risk-management/climate-resilience/nature-based-solutions>.

US Army Corps of Engineers [USACE] Engineering with Nature. (2022). The Application of Engineering with Nature® Principles in Colorado Flood Recovery. Engineer Research and Development Center. ERDC /TNE WN-22-2. 17 p. Disponible en: <https://ewn.erdcdren.mil/publications/archive/the-application-of-engineering-with-nature-principles-in-colorado-flood-recovery/>.

USACE Engineering with Nature. (2022). Symposium: Nature Based Solutions for Puerto Rico. San Juan, Puerto Rico. May 4-5, 2022. Disponible en: <https://ewn.erdcdren.mil/engagements/event/nature-based-solutions-for-puerto-rico/>.

USACE. (2020). “National Wetland Plant List,” 2020. Disponible en: [https://cwbi-app.sec.usace.army.mil/nwpl\\_static/v34/home/home.html](https://cwbi-app.sec.usace.army.mil/nwpl_static/v34/home/home.html).

US Bureau of Reclamation. (2015). Bank Stabilization Design Guidelines. Albuquerque Area Office, Science and Technology. Policy and Administration (Manuals and Standards). Yuma Area Office. US Department of the Interior. Report No. SRH-2015-25. 331 p. Disponible en: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/mands-pdfs/A-BankStab-final6-25-2015.pdf>.

U.S. Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service. (2007). Stream Restoration Design, National Engineering Handbook Part 654. Disponible en: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-11/U.S.%20Department%20of%20Agriculture%2C%20Stream%20Restoration%20Design.pdf>.

USDA Forest Service, US Fish and Wildlife Service, Puerto Rico Department of Natural and Environmental Resources and Envirosurvey, Inc. (2022). Guía de árboles nativos para prácticas de conservación en Puerto Rico e Islas Vírgenes Americanas. p. 202. Disponible en: <https://guiadearboles.org/>.

USDA Natural Resources Conservation Service [NRCS]. (2005). Terminology and Definitions Associated with Revegetation. Technical Note #9. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/plantmaterials/wapmctn6333.pdf>.

USDA NRCS and University of Puerto Rico Agricultural Service Extension. (2006). Guía Ilustrada de Yervas Comunes en Puerto Rico. 312 p. Disponible en: [https://caribbeanclimatehub.org/wp-content/uploads/2019/08/GuiaIlustradadeYervasComunesenPuertoRico\\_2006.pdf](https://caribbeanclimatehub.org/wp-content/uploads/2019/08/GuiaIlustradadeYervasComunesenPuertoRico_2006.pdf).

- USFWS. (n.d.). Guidance for Repair, Replacement, and Clean-up of structures in Streams and Waterways of Puerto Rico and US Virgin Islands. Disponible en: <https://www.fws.gov/media/guidance-repair-replacement-and-clean-structures-streams-and-waterways-puerto-rico-and-us>.
- Viqueira Ríos, R.A. (2018). "Implementation of the Guánica Bay Watershed Management Plan." Yauco, Puerto Rico: Protectores de Cuencas, 2018. Disponible en: [https://www.ncei.noaa.gov/data/oceans/coris/library/NOAA/CRCP/NOS/OCM/Projects/397/ViqueiraRios2018\\_Guanica\\_Watershed\\_Management\\_Implementation.pdf](https://www.ncei.noaa.gov/data/oceans/coris/library/NOAA/CRCP/NOS/OCM/Projects/397/ViqueiraRios2018_Guanica_Watershed_Management_Implementation.pdf).
- Warne, A.G., Webb, R.M.T., and Larsen, M.C. (2005). Water, Sediment, and Nutrient Discharge Characteristics of Rivers in Puerto Rico, and their Potential Influence on Coral Reefs: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5206, 58 p. Disponible en: [https://pubs.usgs.gov/sir/2005/5206/SIR2005\\_5206.pdf](https://pubs.usgs.gov/sir/2005/5206/SIR2005_5206.pdf).
- Yochum, S. E. (2018). Guidance for Stream Restoration. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, National Stream & Aquatic Ecology Center, Technical Note TN-102.4. Fort Collins, CO. 112 p. Disponible en: <https://www.fs.usda.gov/biology/nsaec/assets/yochumusfs-nsaec-tn102-4guidancestreamrestoration.pdf>.

# Apéndice

## Definición de hábitos de las plantas

Hábito	Definición	Mejor para
Helecho	Los helechos son plantas sin flores con hojas en forma de pluma que crecen en ambientes húmedos y sombreados.	Pendientes más bajas y zonas ribereñas donde la humedad es constante.
Plantas trepadoras	Las plantas trepadoras son plantas que cubren el suelo o trepan por estructuras y vegetación.	Varias zonas, sobre todo útiles para cubrir de forma rápida el terreno en las pendientes más bajas o proporcionar estabilidad adicional mediante el entrelazamiento con otra vegetación en las pendientes medias.
Forbia	Las forbias son plantas herbáceas con flores que no son gramíneas (gramíneas, juncias y juncos).	Pendientes altas y medias, donde sus diversos sistemas radiculares pueden ayudar a estabilizar el suelo y atraer a polinizadores beneficiosos.
Graminoide	Esta categoría incluye gramíneas, juncias y juncos, plantas con hojas lineales y sistemas radiculares a menudo fibrosos.	En todas las zonas, particularmente eficaz en la estabilización del suelo y el control de la erosión debido a sus densas alfombras de raíces.
Arbusto	Los arbustos son plantas leñosas con múltiples tallos y una altura relativamente baja.	Riberas superiores y pendientes medias, que proporcionan hábitat y contribuyen a la estabilidad del suelo.
Arbusto/árbol	Se trata de plantas que pueden clasificarse como arbustos grandes o árboles pequeños, según su tamaño y su forma.	Zonas de transición entre la ribera superior y el panorama circundante, que ofrecen estructura y hábitat.
Árbol	Los árboles son plantas grandes y leñosas con un solo tallo o tronco principal.	Zonas de ribera superior que proporcionan sombra, hábitat y sistemas radiculares importantes para la estabilización del suelo.
Palmera	Las palmeras son un grupo diverso de plantas, a menudo caracterizadas por sus grandes hojas perennes.	Según la especie, las palmeras pueden ser adecuadas para las riberas superiores, ya que ofrecen diversidad estructural y control de la erosión.

Adaptado de [la base de datos de plantas del USDA](#)<sup>28</sup>

<sup>28</sup> “Base de datos de plantas del USDA”.

## Definiciones de la condición de humedal

Condición de humedal	Abreviatura	Definición
De tierras altas	UPL	Plantas que se encuentran casi de forma exclusiva (>99 % de presencia) en zonas no húmedas en condiciones naturales.
Tierras altas facultativas	FACU	Plantas que suelen encontrarse (del 67 % al 99 % de presencia) en zonas no húmedas, pero que pueden aparecer ocasionalmente en zonas húmedas.
Facultativa	FAC	Plantas con la misma probabilidad de aparecer en zonas húmedas o no húmedas (del 34 % al 66 % de presencia).
Humedal facultativo	FACW	Plantas que suelen encontrarse (del 67 % al 99 % de presencia) en zonas húmedas, pero que pueden aparecer ocasionalmente en zonas no húmedas.
Obligada a vivir en humedales	OBL	Plantas que se encuentran casi de forma exclusiva (>99 % de presencia) en humedales en condiciones naturales.

Adaptado de [la Lista Nacional de Plantas del USACE](#)<sup>29</sup>

<sup>29</sup> Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, “National Wetland Plant List.”