



BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE

APLICADA A INFRAESTRUCTURAS LINEALES

MANUAL TÉCNICO

BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE
APLICADA A INFRAESTRUCTURAS LINEALES
MANUAL TÉCNICO

© **BIZKAIKO FORU ALDUNDIA – DIPUTACIÓN FORAL DE BIZKAIA (2025)**

EDITORIAL:

BIZKAIKO FORU ALDUNDIA – DIPUTACIÓN FORAL DE BIZKAIA

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUCTURAS Y DESARROLLO TERRITORIAL

c/ Ibáñez de Bilbao; 48009-Bilbao; 94 4067070; ingurugiro_azpiegiturak@bizkaia.eus

DEPOSITO LEGAL LG: BI 00840-2025

Todos los derechos reservados, ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación sin permiso escrito del editor titular del Copyright.

EDITA:

BIZKAIKO FORU ALDUNDIA – DIPUTACIÓN FORAL DE BIZKAIA. DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUCTURAS Y DESARROLLO TERRITORIAL

TÍTULO:

BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE APLICADA A INFRAESTRUCTURAS LINEALES. MANUAL TÉCNICO

AUTORES PRINCIPALES:

PAOLA SANGALLI (Licenciada en Biología y Master en Paisajismo. SCIA SL)

GUILLERMO TARDÍO (*Doctor Ingeniero de Montes. Colaborador SCIA SL*)

COAUTORES:

RAFAEL ETXEBARRIA GÓMEZ (*Licenciado en Ciencias Geológicas- Colaborador IDOM*)

DANIEL RUIZ LARSSON (*Ingeniero de Montes e Ingeniero Técnico Agrícola. Departamento de Infraestructuras y Desarrollo Territorial de la Diputación Foral de Bizkaia*)

IÑIGO URRUTIKOETXEA ÁLVAREZ (*Ingeniero Ambiental. IDOM*)

REVISORES:

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUCTURAS Y DESARROLLO TERRITORIAL DE LA DIPUTACIÓN FORAL DE BIZKAIA

NURIA ARNEDO ÁLVAREZ (*Licenciada en Ciencias Ambientales e Ing. Técnico Agrícola. Ing.Ambiental*)

SAIOA ELORDUI-ZAPATARIETXE DEL ÁGUILA (*Doctora licenciada en Ciencias Ambientales*)

IDOM:

ITXASO FERNÁNDEZ GARCÍA (Licenciada en Biología)

MARIO LIENDO (*Ingeniero industrial*)

VICENTE LLAGUNDO (*Ingeniero químico*)

ITXASO MORA GARCÍA (*Licenciada en Biología*)

SCIA SL

NEKANE GARCÍA ESPADAS (*Licenciada en Ciencias de la Información. SCIA SL*)

MAQUETACIÓN:

NEKANE GARCÍA ESPADAS (*Licenciada en Ciencias de la Información. SCIA SL*)

DIBUJOS TÉCNICAS:

SERGIO SANGALLI (SCIA SL)

INFOGRAFÍAS:

RAFAEL ETXEBARRIA GÓMEZ (*Licenciado en Ciencias Geológicas- Colaborador IDOM*)

AGRADECIMIENTOS:



ALPIVERT, EKOLUR S.L.L., IKERLUR S.L., Paolo Cornellini, Florin Florineth, Amaia Lizarralde, Gino Menegazzi, Fabio Palmeri, Albert Sorolla

DEPOSITO LEGAL LG: BI 00840-2025

SOBRE LOS AUTORES

Paola Sangalli

Licenciada en Biología por la Universidad Central de Barcelona y Máster en Paisajismo por la Universidad Politécnica de Valencia.

Presidente de la EFIB (Federación Europea de Bioingeniería) desde 2016. Presidente de la AEIP (Asociación Española de Ingeniería del Paisaje) de 1995 a 2016. Vicepresidente de la AEP (Asociación Española de Paisajistas) de 2009 a 2012. Profesora de Bioingeniería en diversos másteres, nacionales e internacionales. Proyectista. Organizadora y ponente de diversos cursos y conferencias en Bioingeniería y restauración en varios países. Experiencia profesional en Viverismo, Paisajismo, Bioingeniería y Restauración Ecológica.

Ha participado en diversos proyectos europeos y es, además, autora de diversas publicaciones relacionadas con la Bioingeniería, el Paisaje y la Restauración Ecológica.

Socio fundador y directora del estudio de Bioingeniería y Paisaje Sangalli Coronel y Asociados SL, con sede en Donostia-San Sebastián.

Guillermo Tardío

Doctor Ingeniero de Montes por la Universidad Politécnica de Madrid. Profesor de hidráulica de la Escuela de Montes de Madrid.

Experiencia de más de quince años como ingeniero consultor y proyectista para las distintas administraciones y empresas. Experiencia profesional en ingeniería fluvial , geotécnica, bioingeniería del Paisaje, Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBSs) y restauración del medio natural Colaborador de Sangalli Coronel y Asociados S.L.

Presidente de la AEIP . Redactor de libros, capítulos de libros y artículos científicos en revistas editoriales de impacto internacional Miembro del panel de expertos de distintos proyectos europeos. Primer premio en los CIOP International Innovation & Research Awards- Premio Zerosion febrero 2017.

ÍNDICE

1. PREÁMBULO 13

2. OBJETO. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES 17

3. BIZKAIA. ENCUADRE MEDIO FÍSICO E INFRAESTRUCTURAS LINEALES 21

 3.1 Breve encuadre del medio físico del Territorio Histórico de Bizkaia 22

 3.1.1 Clima 22

 3.1.2 Geología 23

 3.1.3 Hidrografía 24

 3.1.4 Biodiversidad 25

 3.1.5 Espacios naturales protegidos 27

 3.1.6 Medio antrópico 29

 3.2 Características y problemática asociada a la red viaria del Territorio Histórico de Bizkaia 30

 3.2.1 Estructura de la red de carreteras del Territorio Histórico de Bizkaia 31

 3.2.2 Objetivos ambientales en la planificación de carreteras 32

 3.2.3 Problemática asociada a las carreteras 33

4. BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE EN INFRAESTRUCTURAS LINEALES 39

 4.1 Definición, objetivos, ámbitos de aplicación, historia de la Bioingeniería 40

 4.1.1 Objetivos y funciones 41

 4.1.2 Ámbitos de actuación 44

 4.1.3 Breve historia de estas técnicas 45

 4.2 El enfoque y la estrategia en la obra de bioingeniería.

 Fases de la vida de servicio de la obra de bioingeniería 46

 4.2.1 Procesos de deterioro de la madera 47

 4.2.2 Fases e hitos temporales de la metodología Tardío & Mickovski 50

 4.3 Materiales y características 54

 4.3.1 Materiales vegetales vivos y propiedades biotécnicas 54

 4.3.2 Materiales vegetales muertos 60

 4.3.3 Materiales naturales inertes 62

 4.3.4 Materiales artificiales manufacturados 63

5. POTENCIALES APLICACIONES DE LAS TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE EN INFRAESTRUCTURAS LINEALES 65

 5.1 Ejemplos de actuaciones mediante el empleo de bioingeniería 76

 5.1.1 CASO DE ESTUDIO 1: Estabilización de un desprendimiento ubicado en el PK 411-300 de la N-1 (Gipuzkoa) en la estructura P.2.4 76

 5.1.2 CASO DE ESTUDIO 2: Trabajos de revegetación y estabilización en los taludes situados a la altura del PK 1.650 de la GI-3920, Viaducto Basagoiti AP1-Aretxabaleta (Gipuzkoa) 82

 5.1.3 CASO DE ESTUDIO 3: Estabilización de un desprendimiento en una pista forestal 88

 5.1.4 CASO DE ESTUDIO 4: Estabilización de desprendimientos en senda ciclable de Arrigorriaga, zona ubicada entre los polígonos Agirre y Martiartu (Bizkaia) 93

 5.2 Comparativa entre ingeniería civil clásica y bioingeniería del paisaje 97

6. PROYECTO DE BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE 99

 6.1 Análisis preliminar para proyectar bioingeniería 100

 6.1.1 Información climática 100

 6.1.2 Información geológica 101

 6.1.3 Información edáfica 101

 6.1.4 Hidrología de la ladera 102

 6.1.5 Información topográfica 102

 6.1.6 Información del ecosistema y análisis botánico 102

 6.1.7 Otras informaciones 103

 6.2 Geotecnia aplicada a la bioingeniería 103

 6.2.1 Introducción 103

 6.2.2 Empuje de tierras 104

 6.2.3 Análisis de estabilidad de taludes. Comprobaciones de estabilidad global 107

 6.3 Estabilidad de las laderas vegetadas: papel de la vegetación en la estabilidad 113

 6.3.1 Introducción 113

 6.3.2 Efectos del desarrollo de la vegetación en las comprobaciones de estabilidad 113

 6.4 Metodología de cálculo y justificación de las soluciones 117

 6.4.1 Introducción 117

 6.4.2 Mecanismos de refuerzo de las técnicas 117

 6.4.3 Las comprobaciones de estabilidad de las obras de bioingeniería 118

 6.5 Criterios de selección de las técnicas 119

7. PRINCIPALES TÉCNICAS 123

 7.1 TÉCNICAS DE RECUBRIMIENTO 124

 SIEMBRAS POR PROYECCIÓN HÍDRICA 124

 7.1.1 Definición y alcance 124

 7.1.2 Materiales 125

7.1.3 Ejecución de las obras 130

7.1.4 Control de calidad 131

7.1.5 Medición y abono 131

7.1.7 Propuesta de precio descompuesto: hidrosiembra, hidrosiembra enriquecida e hidromanta . 132

7.1.6 Recomendaciones 132

7.2 TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN..... 134

7.2.1 Estaquillado 134

7.2.2 Fajina 139

7.2.3 Lechos de ramaje 146

7.2.4 Empalizadas 154

7.3 TÉCNICAS MIXTAS 160

7.3.1 Entramado vivo simple 160

7.3.2 Entramado doble o Krainer 165

7.3.3 Entramado vivo Latina 170

7.3.4 Entramado Aquila 175

7.3.5 Cálculos y comprobaciones de estabilidad de los entramados de madera 180

7.3.6 Entramado Loricata 196

7.3.7 Enrejado vivo 205

7.3.8 Bajantes escalonadas 218

7.3.9 Cunetas 230

7.3.10 Escollera vegetada o vegetalizada 244

8. CONTROL DE CALIDAD, MANTENIMIENTO, SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN 257

8.1 Control de calidad 258

8.1.1 Material vegetal 258

8.1.2 Bloques, lajas de piedra 258

8.1.3 Madera 258

8.1.4 Ensayos 259

8.2 Mantenimiento 259

8.3 Seguimiento y evaluación de las obras de bioingeniería 260

8.4 Límites de aplicación 266

9. NORMATIVA GENERAL 269

9.1 UNE 270

9.2 Normas Tecnológicas NTJ 271

9.3 Miscelánea 271

10. BIBLIOGRAFÍA 273

10.1 Referencias generales 274

10.2 Referencias específicas 275

10.2.1 Apartado 3.3.1 Materiales vivos y propiedades biotécnicas 275

10.2.2 Apartado 5.4 Metodología de cálculo y justificación de soluciones 276

10.2.3 Apartado 6.1 Técnicas de recubrimiento 277

10.2.4 Apartado 6.2 Técnicas de estabilización-6.2.2 fajina 277

10.2.5 Apartado 6.3 Técnicas mixtas. 6.3.9 escollera vegetada 277

10.2.6 Apartado 6.4 Cálculos entramados de madera 277



1. PREÁMBULO

En marzo del 2022 se publicó el Manual de Técnicas de Bioingeniería (MTB) cuyo objetivo era dar a conocer y facilitar el diseño, el cálculo y la construcción de estas técnicas constructivas que se dirigen fundamentalmente a la estabilización de los taludes. Con este nuevo manual del 2024 se incorporan nuevas técnicas y se pretenden resolver algunas dudas que se planteaban en la primera versión.

La Bioingeniería del Paisaje es una disciplina constructiva aplicada fundamentalmente a la resolución de problemas de estabilidad y de erosión del terreno que emplea material vegetal tanto vivo como muerto, combinado con materiales como piedra o acero.

El material vegetal muerto proporciona una estabilidad inicial al conjunto nada más terminada la construcción, que, al descomponerse con el transcurso del tiempo, es sustituida e incluso reforzada con el crecimiento y desarrollo del sistema radicular de la vegetación implantada. La evolución natural posterior del área de intervención crea las condiciones suficientes para que la vegetación autóctona del lugar colonice, se consolide y se expanda. De este modo, con esta técnica se pretende lograr la estabilización, la restauración vegetal y la regeneración de los ecosistemas, llegando idóneamente a fusionarse completamente con el entorno.

Conviene recordar que la aplicación práctica en la estabilización de taludes mediante el empleo exclusivo de estas técnicas no siempre es factible y dependerá del problema de inestabilidad que se presente, ya que las biotecnias no cumplen en todos los casos las condiciones de esfuerzo mecánico exigibles.

El conjunto de elementos constructivos existentes en la bioingeniería son conocidos también con el término de “biotecnias”, y en la diversa bibliografía publicada se refieren a ellos como “Soluciones basadas en la Naturaleza” o “SbN”.

Las principales ventajas que ofrecen estas técnicas son:

- Mejora la funcionalidad de las estructuras de conectividad ecológica, reduciendo en consecuencia la accidentalidad por atropellos.
- Aumenta y refuerza con el paso del tiempo la estabilidad del terreno mediante sistemas naturales que evolucionan hacia ecosistemas naturales.
- Fomenta la infiltración y percolación en el terreno, así como los procesos de intercepción, evaporación/evapotranspiración del agua, promoviendo el ciclo natural del agua y frenando los procesos erosivos.
- Mejora la integración ambiental y paisajística de las obras, así como la restauración de los ecosistemas.
- Tienen una huella de carbono menor que las técnicas de ingeniería tradicional equivalentes, ya que, en muchos casos, utilizan materiales locales y naturales, reduciendo el transporte y procesamiento. Además, las plantas utilizadas actúan como sumidero de CO₂, ayudando a mitigar el cambio climático mientras estabilizan y controlan la erosión.

Son técnicas implantadas sólidamente desde la década de los años 60 del siglo pasado en otros países europeos, aunque se tiene conocimiento que los romanos ya usaban estas técnicas de estabilización.

En un principio se dirigían al ámbito fluvial y a las obras de restauración hidrológica-forestal, ampliándose paulatinamente a otros campos de aplicación, como las infraestructuras lineales.

La Comisión Europea adoptó el año 2014 una estrategia destinada a fomentar el uso de las infraestructuras verdes al reconocer que se trata de una de las principales herramientas para abordar las amenazas a la biodiversidad, así como para integrar la biodiversidad en otras acciones.

Fruto de este enfoque, a nivel estatal, se ha elaborado la Estrategia Nacional de Infraestructura Verde y de la Conectividad y Restauración Ecológicas, aprobada por la Orden PCM/735/2021, de 9 de julio¹, que determina que cada una de las CC.AA. deberán elaborar sus propias estrategias.

Aplicado a nuestro ámbito de proyección y ejecución de infraestructuras, destacamos la:

- META 1. Reducir los efectos de la fragmentación y de la pérdida de conectividad ecológica ocasionados por cambios en los usos del suelo o por la presencia de infraestructuras.
- META 2. Restaurar los hábitats y ecosistemas de áreas clave para favorecer la biodiversidad, la conectividad, o la provisión de servicios de los ecosistemas, priorizando soluciones basadas en la naturaleza.

En consecuencia, la estrategia estatal –y europea– se traslada a un ámbito más cercano, haciendo que diferentes órganos ambientales de nuestro entorno próximo (Gobierno Vasco, Diputación Foral Bizkaia, y Agencia Vasca del Agua) demanden la inclusión de este tipo actuaciones en los proyectos y obras de infraestructuras.

Para finalizar, queremos agradecer el trabajo y la dedicación de todo el equipo que ha participado en la redacción y la revisión de este manual. Somos conscientes de la dedicación de un amplio equipo multidisciplinar que sin duda contribuye a tener visión holística en la resolución de los problemas de estabilidad de los taludes.

El conjunto de elementos constructivos existentes en la bioingeniería es conocido también con el término de “biotecnias”, y en la bibliografía publicada se refieren a ellos como “Soluciones basadas en la Naturaleza” o “SbN”.

La Bioingeniería del Paisaje es una disciplina constructiva aplicada fundamentalmente a la resolución de problemas de estabilidad y de erosión del terreno que emplea material vegetal tanto vivo como muerto, combinado con materiales como piedra o acero.

¹ Ley 33/2015, de 21 de septiembre, por la que se modifica la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad



2. OBJETO. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES



La presente guía de técnicas de bioingeniería nace por el interés en ampliar el conocimiento de nuevas técnicas que contribuyan a la naturalización de las obras lineales que acomete la Diputación Foral de Bizkaia.

Estas técnicas son ya una realidad en nuestro territorio, principalmente en actuaciones en entornos fluviales e incipientemente en obra civil, para solventar problemas de estabilización, entre otros. El objetivo principal es facilitar su introducción en las obras civiles que se desarrollan en el territorio Histórico de Bizkaia.

No debemos olvidar que hay un vínculo estrecho entre sostenibilidad y reducción de la huella de carbono y que cualquier actuación que vaya en sintonía debe ser explorada y puesta en valor. La bioingeniería prioriza el empleo de materiales vivos de proximidad; así pues, se reducen considerablemente las necesidades de transporte y, además, las especies vegetales introducidas producirán la fijación de CO₂. La bioingeniería parte de la aplicación del empleo de materiales vivos para ejercer funciones de sostenimiento, drenaje, filtración y depuración, así como de integración y restauración de hábitats.

El desarrollo y avance científico ha permitido cuantificar las diversas contribuciones que los materiales vivos generan con su implantación, tanto por sí solos como en combinación con otros elementos. A medida que se cuenta con mayores conocimientos empíricos y datos extraídos de obras realizadas en las últimas décadas, se van venciendo incertidumbres y miedos. Son tan numerosas las aplicaciones exitosas, que las técnicas de bioingeniería se posicionan en muchas ocasiones como una alternativa validada y coherente con un mundo más sostenible y natural.

Si bien el origen de la bioingeniería viene de épocas muy antiguas donde el ser humano no disponía de hormigón, pero contaba con madera, piedras y plantas, es en Europa Central donde a partir de 1960 es acogida por la ingeniería civil y va tomando entidad propia. En este sentido, las actuaciones de bioingeniería estarían relacionadas con los ODS 2030, en concreto, con el objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad.

La Bioingeniería del Paisaje es ya una realidad en nuestro territorio, principalmente en actuaciones en ámbito fluvial e incipientemente en obra civil



A photograph of a steep, grassy hillside. A rustic wooden fence runs diagonally across the upper part of the slope. The hillside is covered in dense green vegetation, including various grasses and small shrubs. In the background, there are several large, leafy trees. The sky is visible at the top, showing some clouds. In the bottom right corner, a portion of a paved road is visible.

3. BIZKAIA. ENCUADRE MEDIO FÍSICO E INFRAESTRUCTURAS LINEALES

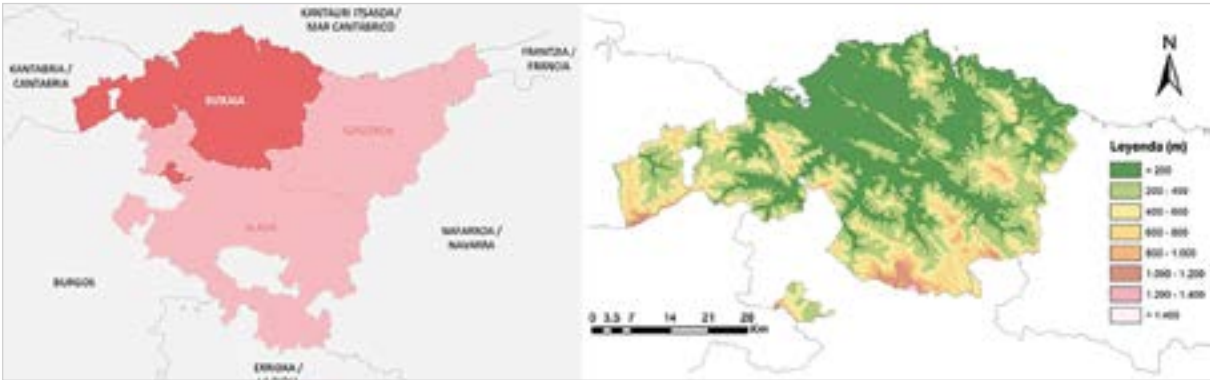


Imagen 1. Ubicación y mapa hipsométrico del Territorio Histórico de Bizkaia. Fuente: GeoEuskadi. Gobierno Vasco

3.1 BREVE ENCUADRE DEL MEDIO FÍSICO DEL TERRITORIO HISTÓRICO DE BIZKAIA

La Bioingeniería del Paisaje es una disciplina que se proyecta desde y para el territorio. Es por ello por lo que, a continuación, se lleva a cabo una breve caracterización del medio físico del Territorio Histórico de Bizkaia. En la aplicación concreta, el análisis debe bajar a escala de proyecto, teniendo en cuenta todas estas consideraciones previas.

El ámbito de estudio del presente Manual de Bioingeniería del Paisaje aplicada a infraestructuras lineales está enmarcado en el Territorio Histórico de Bizkaia. Ubicada al norte de la Península Ibérica y limitada por el Mar Cantábrico al norte, el Territorio Histórico de Gipuzkoa al este, el Territorio Histórico de Álava y la provincia de Burgos (Comunidad de Castilla y León) al sur, y la Comunidad Autónoma de Cantabria al oeste, Bizkaia tiene una extensión total de 2.217,2 km², distribuidos en 9 áreas funcionales y 113 municipios que albergan una población de alrededor de 1.142.000 habitantes.

En lo que a la orografía se refiere, Bizkaia presenta relieves de cabecera de montaña media en la que las cumbres más importantes (Gorbeia, 1.482 m; Zalamá, 1.343 m; Anboto, 1.331 m; Udalaiz, 1.120 m; y Oiz, 1.026 m) se sitúan en la zona sur del territorio y el paisaje con un relieve más abrupto en las Encartaciones.

Previo al análisis de las características propias de la red viaria de Bizkaia y sus problemáticas asociadas, y con el objetivo de identificar los aspectos medioambientales más relevantes a tener en cuenta a la hora de planificar y ejecutar actuaciones relativas a infraestructuras viarias, se presenta, a modo introductorio, una breve caracterización ambiental del Territorio Histórico de Bizkaia.

3.1.1 Clima

El Territorio Histórico de Bizkaia se localiza sobre dos zonas climáticas: el clima atlántico o templado húmedo predominante en la vertiente atlántica, extensión que comprende gran parte de Bizkaia, y el clima subatlántico que se limita a un pequeño reducto situado al sur y perteneciente a la zona media de Euskadi. Ambos casos, con una fuerte influencia del océano Atlántico, se caracterizan por temperaturas suaves a lo largo de todo el año que sitúan las temperaturas medias anuales en torno a 14 °C en las cercanías de la costa y 11-12 °C en las zonas interiores. Además, si bien las zonas pertenecientes al clima subatlántico tienden a registrar precipitaciones más moderadas, estas son importantes en todo el Te-

El Territorio Histórico de Bizkaia se localiza sobre dos zonas climáticas: el clima atlántico o templado húmedo predominante en la vertiente atlántica, extensión que comprende gran parte de Bizkaia, y el clima subatlántico que se limita a un pequeño reducto situado al sur y perteneciente a la zona media de Euskadi

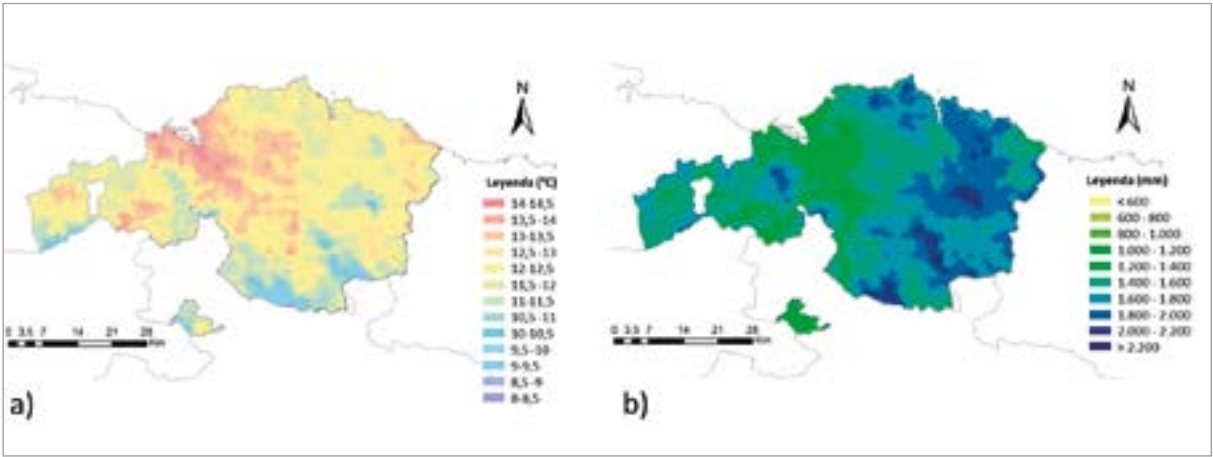


Imagen 2. a) Temperatura media anual y b) precipitación acumulada anual. Fuente: Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA), Ministerio para la Transición Ecológica

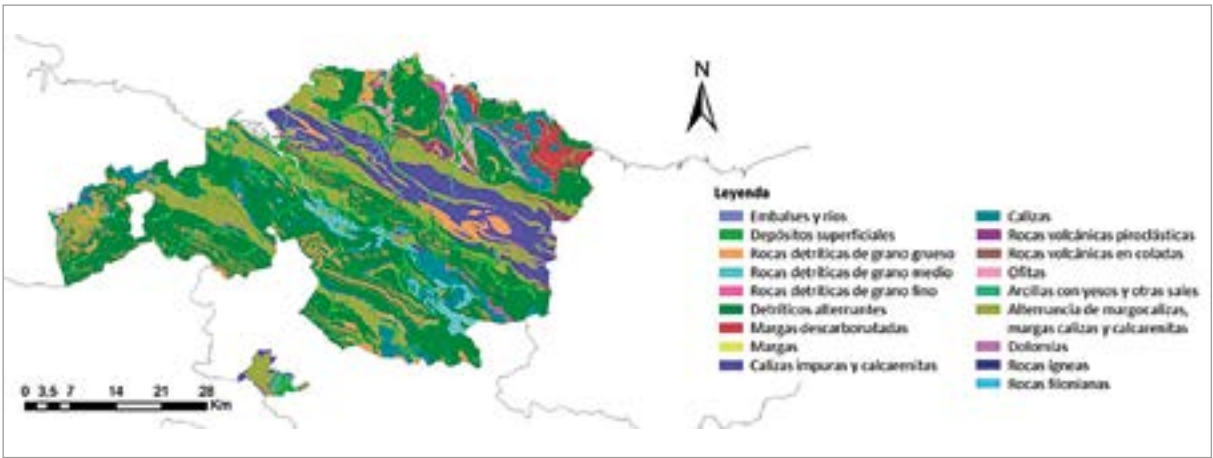


Imagen 3. Mapa litológico de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Fuente: GeoEuskadi. Gobierno Vasco

rritorio Histórico y se distribuyen a lo largo de todo el año con máximos en las estaciones de otoño e invierno. La precipitación media anual acumulada en Bizkaia se cifra en 1.200 mm, oscilando entre los 1.000 mm de Orduña y cercanías del puerto de Bilbao y los más de 2.200 mm en el macizo del Gorbeia, Urkiola y Oiz.

3.1.2 Geología

Geológicamente, el Territorio Histórico de Bizkaia se sitúa en la zona noroccidental de la Cuenca Vasco-Cantábrica. Si bien esta puede considerarse la prolongación hacia el oeste de la barrera de los Pirineos, se encuentra fuera de la misma y sus características estructurales presentan diferencias.

Situada entre el Macizo Hercínico asturiano al oeste y la Cordillera Pirenaica al este, la Cuenca Vasco-Cantábrica constituye una cuenca sedimentaria individualizada a finales del período Jurásico que sirvió de lugar de recepción de aportes de sedimentos durante el Cretácico y Paleógeno. Posteriormente, durante la Orogenia Alpina, el conjunto de dichos materiales fue plegado formando una serie de estructuras que perduran hasta la actualidad y presentan una dirección noroeste-sureste bastante uniforme. De los tres dominios que conforman la Cuenca Vasco-Cantábrica, Bizkaia se sitúa en la zona del Arco Vasco, aglutinando

Geológicamente, el Territorio Histórico de Bizkaia se sitúa en la zona noroccidental de la Cuenca Vasco-Cantábrica

materiales pertenecientes a los Macizos Paleozoicos Vascos y los materiales mezozoicos y terciarios.

En cuanto a la litología presente en la zona, la mayoría de la superficie del Territorio Histórico de Bizkaia se encuentra sobre calizas, margas con areniscas y materiales sedimentarios como las dolomías. La naturaleza de dichos materiales, bajo ciertas circunstancias, puede proyectar diversos problemas en proyectos de construcción de infraestructuras lineales. Entre ellos se pueden encontrar la inestabilidad de taludes en terrenos calizos karstificados, y la expansividad, colapsabilidad, rotura frágil y consiguiente inestabilidad de las margas.



Imagen 4. Unidades hidrológicas en el Territorio Histórico de Bizkaia. Fuente: GeoEuskadi. Gob. Vasco

3.1.3 Hidrografía

Los ríos presentes en el Territorio Histórico de Bizkaia pertenecen a tres ámbitos o Demarcaciones Hidrográficas. La mayor parte de ellos se sitúan en la Demarcación del Cantábrico Oriental, los localizados en el extremo oeste corresponden a la Demarcación del Cantábrico Occidental y una pequeña parte, que transcurre al sur de Bizkaia, a la Demarcación Hidrográfica del Ebro.

La mayoría de ellos, a su vez, se enmarcan en 8 unidades hidrológicas que vierten sus aguas hacia la cuenca cantábrica. Se trata de las unidades hidrológicas del Karrantza, Agüera, Barbadun, Ibaizabal, Butroe, Oka, Lea y Artibai, en las que sus principales ríos transcurren en dirección sur-norte, a excepción del río Ibaizabal cuya dirección principal es este-oeste. Se trata, en todos los casos, de ríos de corto recorrido y trazado sencillo sin relieves montañosos en su recorrido. Asimismo, existen otras tres pequeñas áreas pertenecientes a las unidades hidrológicas del Baia, Zadorra y Deba, por lo que, en conjunto, se establecen 11 unidades hidrológicas en Bizkaia. El Baia y el Zadorra vierten a la cuenca mediterránea y el río Deba a la cantábrica.

Analizado el estado global de las aguas superficiales de Bizkaia, fruto de la combinación entre el estado químico y ecológico de estas, se obtiene que en 2022 las masas de agua del Karrantza, Herrerías, Nervión I, Butroe, Asua A, Gobelás A, Artigas A, Artibai A, Ibaizabal I, Ibaizabal II, Elorrio II, Elorrio I, Zadorra y Altube II muestran un valor ‘Peor que bueno’. Estos han de ser valores a tener en cuenta ya que las carreteras y los presumibles elevados niveles de contaminación del agua de escorrentía asociada a estas pudieran empeorar el estado de las masas de agua implicadas en las actuaciones. Dicho perjuicio, más allá de menoscabar el estado

Los ríos presentes en el Territorio Histórico de Bizkaia pertenecen a tres ámbitos o Demarcaciones Hidrográficas. La mayor parte de ellos se sitúan en la Demarcación del Cantábrico Oriental, los localizados en el extremo oeste corresponden a la Demarcación del Cantábrico Occidental y una pequeña parte, que transcurre al sur de Bizkaia, a la Demarcación Hidrográfica del Ebro

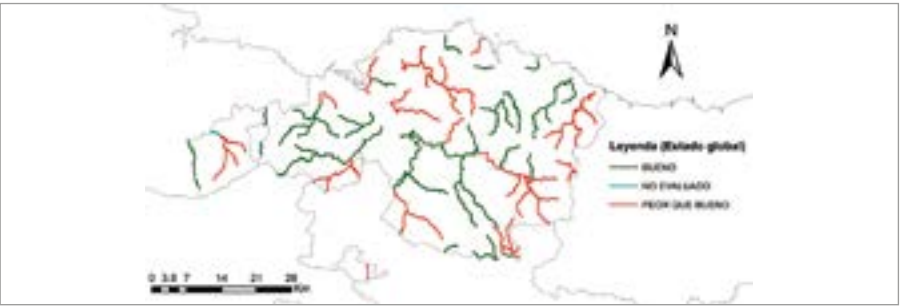


Imagen 5. Estado global del agua de los ríos del Territorio Histórico de Bizkaia. 2018. Fuente: GeoEuskadi. Gobierno Vasco

químico de las aguas, afectaría también al ecológico debido a, entre otros, la posible alteración hidromorfológica de los cauces que acarrearán las actuaciones.

Por último, los valores hidrológicos y de inundabilidad también resultan relevantes, principalmente en aquellos tramos en los que la red viaria discurre por fondos de valle y las actuaciones sobre la infraestructura lineal pueden generar alteraciones sobre los sistemas naturales de drenaje, aumentando el riesgo de inundabilidad.

3.1.4 Biodiversidad

Según el Inventario Español de Especies Terrestres, Bizkaia, como parte de la Comunidad Autónoma del País Vasco, se sitúa en una de las Comunidades que, junto con La Rioja y Navarra, mayor riqueza en especies alberga. Dicho inventario recoge la distribución, abundancia y estado de conservación de la fauna y flora terrestre española y, a través de la riqueza de especies, representa la cantidad de especies —de aves, mamíferos, anfibios, reptiles, peces continentales, invertebrados y flora vascular y no vascular— presentes en los diferentes puntos de la geografía nacional.

Localizada entre los reinos Eurosiberiano y Mediterráneo y bien colocada en las rutas migratorias, Bizkaia, y especialmente el sur del Territorio, se erige como una de las mejores estancias nacionales para la fauna y la flora. En este sentido, la mayor parte de las cuadrículas en las que se divide cuentan con un número de especies superior a 140, siendo aquellas con una riqueza menor las localizadas alrededor de la AP-68, N-634 y el este del Territorio. El siguiente mapa muestra el estado de la rica diversidad biológica del Territorio Histórico de Bizkaia.

Imagen 6. Riqueza de especies por cuadrícula de 10 x 10 km en el Territorio Histórico de Bizkaia. Fuente: MITECO



Según el Inventario Español de Especies Terrestres, Bizkaia, como parte de la Comunidad Autónoma del País Vasco, se sitúa en una de las Comunidades que, junto con La Rioja y Navarra, mayor riqueza en especies alberga.



Imagen 7. Especies de flora y fauna incluidas en el “Catálogo Vasco de Especies Amenazadas de la Fauna y Flora, Silvestre y Marina” en el Territorio Histórico de Bizkaia. Fuente: GeoEuskadi. Gob. Vasco.

3.1.4.1. Vegetación

En el Territorio Histórico de Bizkaia, las plantaciones forestales de *Pinus radiata*, con una ocupación del 23,20 % del territorio, son el tipo de vegetación preponderante. En segundo lugar, se sitúan los prados y cultivos atlánticos con un 17,98 % de la superficie vizcaína, y otras plantaciones forestales con el 14,81 % de superficie del Territorio. Dentro de los diez principales tipos de vegetación en Bizkaia, que abarcan en total el 83,73 % del terreno, se incluye un 7,11 % de bosque autóctono adulto.

Las infraestructuras lineales tienen una influencia directa sobre la vegetación y sus efectos son apreciables desde los primeros metros inmediatos a la carretera. Dichos espacios son ocupados por la vegetación ruderal-nitrófila, que ocupa los espacios más intensamente humanizados y constituye el cuarto tipo de vegetación más abundante de Bizkaia con una ocupación del 7,84 % del territorio. Además, está comprobado que las zonas en las que se desarrollan actuaciones (autopistas, carreteras, ensanches o arreglos de tramos existentes, taludes, terraplenes, etc.), habitualmente desprovistas de una revegetación adecuada, suelen constituir focos de entrada o asentamientos de plantas exóticas invasoras, a cuya dispersión también contribuyen las infraestructuras, siendo esta la segunda causa de pérdida de biodiversidad en el mundo.

3.1.4.2 Flora y fauna amenazada

En Euskadi, la Ley 16/1994, de 30 de junio, de conservación de la naturaleza del País Vasco suscitó la realización del “Catálogo Vasco de Especies Amenazadas de la Fauna y Flora, Silvestre y Marina” con el objetivo de promover la protección de especies y recopilar el conocimiento actualizado de las especies de flora y fauna amenazadas a nivel autonómico. De dicho catálogo se obtiene que las zonas montañosas, los acantilados, las marismas y los demás sistemas costeros son las áreas preferentes de distribución de plantas amenazadas; y los humedales, los ríos, los bosques de frondosas, las cuevas y los roquedos las zonas que cobijan la mayor parte de la fauna sometida a riesgos.

Al limitar el análisis de las especies amenazadas de fauna y flora al Territorio Histórico de Bizkaia, son 25 las especies de flora que se encuentran amenazadas, comprendiendo una superficie total de 2.455 hectáreas en los municipios de Amorebieta y Bakio y los entornos de Urdaibai y del Parque Natural de Armañón.

En lo que a las especies de fauna se refiere, el pez espinoso, el visón europeo, el paño europeo, la nutria euroasiática y el cormorán moñudo constituyen el listado de especies amenazadas de Bizkaia.

3.1.4.3 Corredores ecológicos

Actualmente, Euskadi cuenta con una red de corredores ecológicos cuyo propósito no es otro que responder a la necesidad de conservar y restaurar la conexión funcional entre los espacios naturales poseedores de especies silvestres cuyas mermadas poblaciones tendían al aislamiento.

Incluida en la actualización de las Directrices de Ordenación del Territorio (DOT), aprobada definitivamente en 2019, la Red persigue fomentar la conexión y la coherencia ecológica de la Red Natura 2000, como establece el artículo 10 de la Directiva 92/43/CEE del Consejo, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. Concretamente, busca fomentar la conexión de aquellos espacios Natura 2000 poseedores de hábitats y especies que sufren una fragmentación detectable a escala regional. La delimitación de la Red de Corredores debería suponer repercusiones en la regulación de los usos del suelo y establecimiento de medidas tanto de restauración ecológica como de prevención de impactos.

En Bizkaia, la Red de Corredores Ecológicos es intersecada por siete carreteras, constituyendo puntos críticos que deberán de ser salvados para no interferir en el papel fundamental esperado de estas figuras de infraestructura verde. Las carreteras mencionadas son: AP-8, N-240, N-634, BI-633, BI-625, E-05/E-70/E-80/AP-8 y N-622.

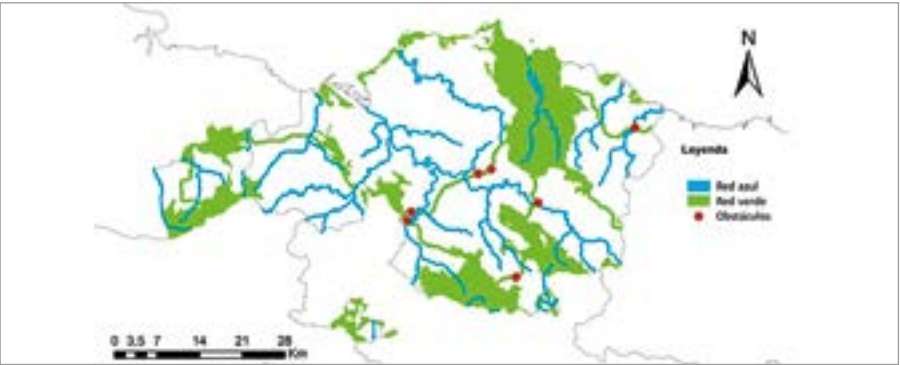
3.1.5 Espacios naturales protegidos

La superficie natural protegida está constituida por aquellas áreas que, debido a sus valores naturales sobresalientes, están específicamente dedicadas a la conservación de la naturaleza y sujetas, por lo tanto, a un régimen jurídico especial para su protección.

En Euskadi, y consecuentemente en el Territorio Histórico de Bizkaia, la Ley 9/2021, de 25 de noviembre, de conservación del patrimonio natural de Euskadi, que establece las diferentes categorías de espacios protegidos del patrimonio natural, clasifica estos como espacios naturales protegidos (parques natura-

La superficie natural protegida está constituida por aquellas áreas que, debido a sus valores naturales sobresalientes, están específicamente dedicadas a la conservación de la naturaleza y sujetas, por lo tanto, a un régimen jurídico especial para su protección

Imagen 8. Red de Corredores Ecológicos de Euskadi en el Territorio Histórico de Bizkaia: red azul, red verde y obstáculos de la red. Fuente: GeoEuskadi. Gobierno Vasco.



Las infraestructuras lineales tienen una influencia directa sobre la vegetación y sus efectos son apreciables desde los primeros metros inmediatos a la carretera

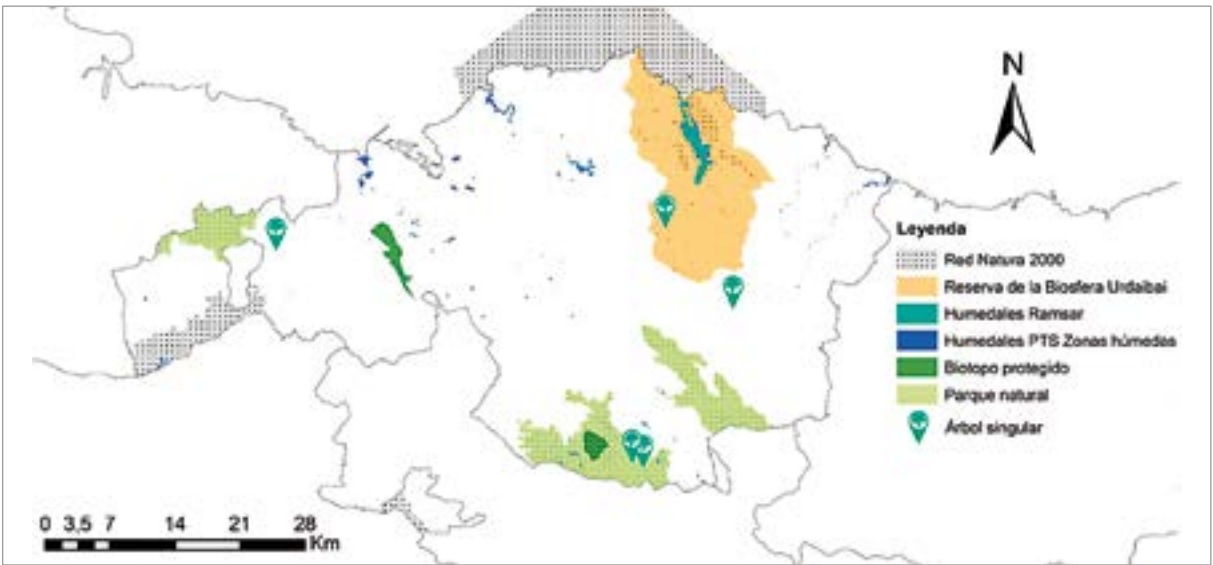
La designación de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai, fue un hito en la conservación de la naturaleza vasca en 1989

les, reservas naturales, monumentos naturales y paisajes naturales protegidos), espacios naturales protegidos de la Red Natura 2000 (lugares de importancia comunitaria (LIC), zonas especiales de conservación (ZEC) y zonas de especial protección para las aves (ZEPA) y espacios protegidos en aplicación de instrumentos internacionales (reservas de la biosfera, humedales de importancia internacional de la Convención relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas (Ramsar), geoparques declarados por la Unesco, áreas protegidas del convenio Oskar, sitios naturales de la Lista del Patrimonio Mundial y reservas biogenéticas del Consejo de Europa).

Más allá de las figuras de conservación incluidas en la citada Ley, Bizkaia cuenta también con humedales cuya elevada importancia es reconocida por el Plan Territorial Sectorial (PTS) de Zonas Húmedas de la Comunidad Autónoma del País Vasco, o por instrumentos internacionales como el Convenio de Ramsar; y con la Reserva de la Biosfera de Urdaibai, cuya designación fue un hito en la conservación de la naturaleza vasca en 1989. Todas ellas, que en la actualidad comprenden un total de 46.514 hectáreas o lo equivalente al 21 % de la superficie total de Bizkaia, desempeñan una función decisiva para la conservación de los ecosistemas, la supervivencia de las especies, y el mantenimiento de los procesos ecológicos y de los bienes y servicios ecosistémicos.

En el Territorio Histórico de Bizkaia existen un total de 17 espacios Red Natura 2000 (3 Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) y 13 Zonas de Especial Conservación (ZEC) que abarcan una extensión total de 26.665 hectáreas o lo equivalente al 12 % de la superficie total de Bizkaia; 3 Parques Naturales (Urkiola, Gorbeia y Armañón) con una superficie de 15.707 hectáreas (7,1 % del Territorio); 2 Monumentos Naturales (Itxina y Gaztelugatxe) y un Paisaje Natural Protegido (Meatzaldea) cuya área se cifra en 1.555 hectáreas (0,7 % de Bizkaia); humedales regulados por el Plan Territorial Sectorial (PTS) de Zonas Húmedas de la Comunidad Autónoma del País Vasco y humedales RAMSAR con áreas totales de 1.624 y 723 hectáreas, respectivamente; la Reserva de la Biosfera de Urdaibai; y 5 árboles singulares.

Imagen 9. Espacios naturales protegidos del Territorio Histórico de Bizkaia. Fuente: GeoEuskadi. Gobierno Vasco.



La red de carreteras del territorio histórico de Bizkaia se entrelaza con numerosos de estos espacios naturales y, si bien constituye un elemento de separación y un obstáculo al necesario desplazamiento de las especies animales entre los diferentes hábitats, resulta un elemento dinamizador de estos espacios al mejorar su accesibilidad y contribuir a la concienciación de la población frente a la delicadeza de estos espacios.

3.1.6 Medio antrópico

El Territorio Histórico de Bizkaia se encuentra constituido por 113 municipios que albergan una población total de 1.149.044 habitantes (a 1 de enero de 2020), con una tasa negativa de crecimiento respecto a 1976. Las mujeres representan casi el 52 % del total. La población existente y la limitada extensión del Territorio hacen que Bizkaia se sitúe como la quinta provincia con mayor densidad poblacional del estado.

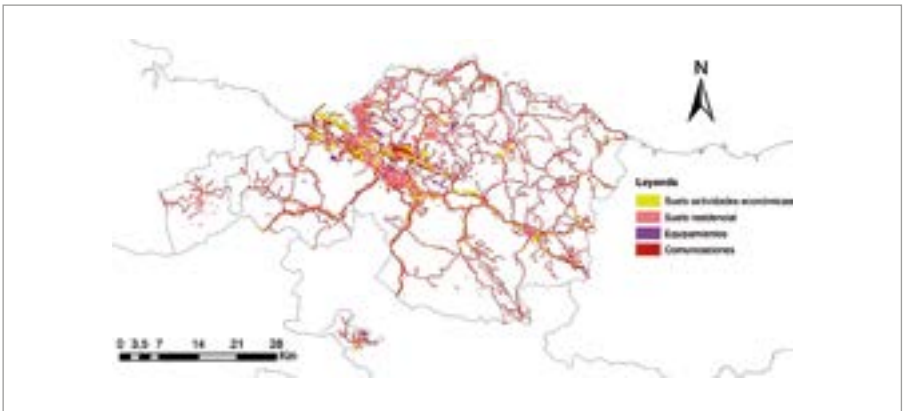


Imagen 10. Infraestructuras y servicios destinados a actividades antrópicas: suelo residencial, suelo actividades económicas, equipamientos y comunicaciones (infraestructuras y transportes viarios, infraestructuras y transportes de puertos, infraestructuras y transportes de aeropuertos, infraestructuras y transportes de ferrocarril e infraestructuras y transportes de TAV. Fuente: GeoEuskadi. Gobierno Vasco

Dicha concentración se traduce en que Bizkaia requiera de importantes infraestructuras y servicios. En este sentido, 22.011 hectáreas o el 9,9 % del Territorio Histórico de Bizkaia está destinado a algún uso ligado a la actividad humana. Destacan las 10.594 hectáreas (4,8 %) ocupadas por terrenos residenciales y las 5.226 hectáreas (2,4 %) reservadas para actividades económicas. La superficie destinada a infraestructuras de transporte (viario, puertos, aeropuertos, ferrocarril y TAV) también sobresale al concentrar un total de 4.282,7 hectáreas que representan 1,9 % del territorio. De entre todas ellas, son significativas las 3.533 hectáreas destinadas a infraestructuras y transportes viarios.

En lo que a la contaminación del suelo asociada a la actividad antrópica se refiere, Euskadi cuenta con la Ley 4/2015, de 25 de junio, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo para el desarrollo legislativo de dicho ámbito. Dicha Ley define como suelo contaminado “todo suelo que presente una alteración de origen antrópico, en relación con sus características químicas, incompatible con sus funciones debido a que suponga para el uso actual, o pueda suponer, en el supuesto de cambio de uso, un riesgo inaceptable para la salud de las personas o el medio ambiente”.

Se define como suelo contaminado “todo suelo que presente una alteración de origen antrópico, en relación con sus características químicas, incompatible con sus funciones debido a que suponga para el uso actual, o pueda suponer, en el supuesto de cambio de uso, un riesgo inaceptable para la salud de las personas o el medio ambiente”

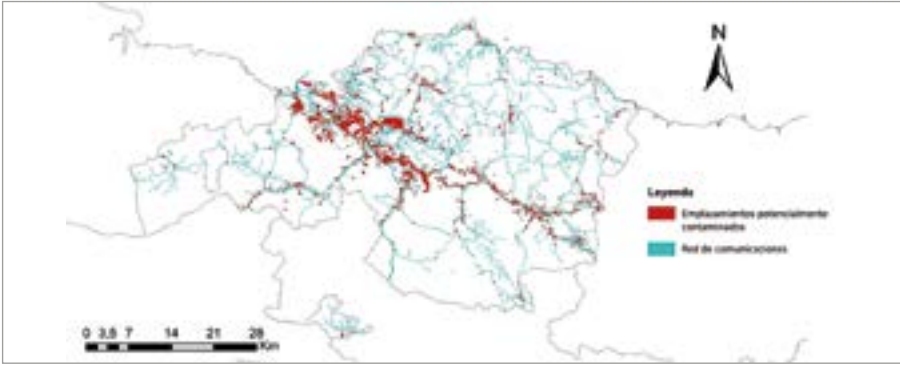


Imagen 11. Inventario de suelos potencialmente contaminados de Euskadi en el Territorio Histórico de Bizkaia. Fuente: GeoEuskadi. Gobierno Vasco

La propia Ley, en su ORDEN de 21 de diciembre de 2017, del Consejero de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda, de actualización del inventario de suelos que soporten o hayan soportado actividades o instalaciones potencialmente contaminantes del suelo, presenta el inventario de suelos que soportan o han soportado actividades o instalaciones potencialmente contaminantes del suelo. Este inventario es actualizado periódicamente, constituyendo la versión de 2015 la más actualizada. El análisis de los suelos potencialmente contaminados presentes en el Territorio Histórico de Bizkaia concluye un total de 5.420 parcelas inventariadas que suman una superficie de 4.674,11 hectáreas de terreno, estando la gran mayoría de ellas en torno al Gran Bilbao, zona con una alta densidad de infraestructuras viarias, y al eje marcado por la AP-8.

Dicha contaminación puede suponer un grave riesgo tanto para la salud de las personas como de los ecosistemas. Por lo tanto, al planificarse actuaciones para la construcción, ampliación o reparación de viales, se requerirá llevar a cabo una investigación de la calidad del suelo para valorar la posibilidad de que se produzcan contaminaciones significativas por la excavación y movilización de suelo.

3.2 CARACTERÍSTICAS Y PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LA RED VIARIA DEL TERRITORIO HISTÓRICO DE BIZKAIA

El futuro de nuestras carreteras se enfrenta al reto del cambio climático, hecho que destaca por su enorme trascendencia y nos obliga a adoptar todas las medidas necesarias para cumplir un objetivo de neutralidad de carbono. En este sentido, el escenario que rodea al transporte y las carreteras requiere de acciones concertadas, necesariamente transversales que ayuden a vislumbrar un futuro más sostenible, con una sociedad más adaptada al cambio climático y más resiliente. La construcción de nuevas vías de transporte debe incluir entre sus prioridades la preservación, para las futuras generaciones, de los valores medioambientales y paisajísticos existentes en el territorio, de modo que se garantice la conservación de la biodiversidad y la viabilidad de las especies amenazadas.

Además, debemos adaptarnos a escenarios socioeconómicos cambiantes, donde tienen cabida las situaciones más inverosímiles que pueden alterar nuestras planificaciones.

Son muchas las iniciativas, tanto legislativas como normativas, de la propia Diputación Foral de Bizkaia como del Gobierno Vasco, Gobierno Español y

Unión Europea, que promueven un cambio para alcanzar ese reto; medidas que van desde la movilidad sostenible, intermodalidad de los medios de transporte, coexistencias e implantaciones tecnológicas, todas ellas para lograr un crecimiento nulo de la movilidad motorizada.

Hemos llegado a un momento en el que el patrimonio viario existente debe ser utilizado de la mejor forma posible, mejorando para atender a la demanda en detrimento de nuevas construcciones convencionales.

3.2.1 Estructura de la red de carreteras del Territorio Histórico de Bizkaia

La Diputación Foral de Bizkaia cuenta con 2 redes principales. Por una parte, tenemos la Red Funcional que incorpora aproximadamente 650 km distribuidos en la Red de Interés Preferente, Red Básica y Red Complementaria, y por otra, más de 500 km de la Red Local o capilar. Dentro de la Red Preferente encontramos los dos grandes Ejes de Comunicación que atraviesan el territorio: Corredores Este-Oeste de conexión con Cantabria y Gipuzkoa y Norte-Sur de conexión con la meseta y el Valle del Ebro.



Imagen 8. Red de Corredores Ecológicos de Euskadi en el Territorio Histórico de Bizkaia: red azul, red verde y obstáculos de la red. Fuente: GeoEuskadi. Gobierno Vasco

La misión de la Red Funcional de Carreteras es garantizar la conexión de Bizkaia con otras redes de Comunicación supraterritoriales y terminales de transporte (Puerto y Aeropuerto). Esta Red Funcional también garantiza la estructuración comarcal de las diferentes Comarcas, garantizando una conexión con la red de transportes principal del territorio. La Red Local, en cambio, tiene una misión más capilar; es decir, es la encargada de posibilitar el acceso a todos los espacios de Bizkaia.

Imagen 13. Distribución de las diferentes redes viarias del Territorio Histórico de Bizkaia. Fuente: Plan Director de Carreteras. DFB

Distribución de carreteras de Bizkaia		Km
Red Funcional	Red de Interés preferente	242
	Red Básica	209
	Red Complementaria	23
	Red Convencional	209
Red Local	Red Local	596
		1.279 Km

El patrimonio viario existente debe ser utilizado de la mejor forma posible, mejorando para atender a la demanda en detrimento de nuevas construcciones convencionales

Debemos adaptarnos a escenarios socioeconómicos cambiantes, donde tienen cabida las situaciones más inverosímiles que pueden alterar nuestras planificaciones

La densidad de la red de carreteras del territorio es alta, lo que se traduce en una importante apuesta económica tanto en inversión en nuevas estructuras como en su correcto mantenimiento y conservación.

3.2.2 Objetivos ambientales en la planificación de carreteras

Estas redes de comunicación deben de ser objeto de un estudio y mejora continua, que permita su correcto uso y funcionamiento, cumpliendo unos objetivos ambientales prioritarios de acuerdo con el Tercer Plan General de Carreteras del País Vasco y Plan Director de Carreteras de la DFB:

- Mejorar la convivencia de la red de carreteras actuales y futuras con los ríos y otras masas de agua, incidiendo en la relación entre régimen de avenidas y calidad de las aguas, y la presencia de estas vías.
- Reducir la fragmentación de hábitats atribuible a la red de carreteras actuales y futuras, particularmente en aquellos enclaves ecológicos de conectividad de mayor relevancia.
- Integración en el paisaje de la red de carreteras actuales y futuras.
- Mejorar los perfiles sonoros de la red de carreteras actuales y futuras en las áreas de mayor sensibilidad al ruido.
- Promover la intermodalidad en la red de carreteras actuales y futuras, favoreciendo así una mayor sostenibilidad del sistema de transportes.
- Mejorar la habitabilidad de la red de carreteras actuales y futuras, y sus márgenes, favoreciendo un tratamiento adecuado del tráfico.

Las nuevas infraestructuras deben contemplar la necesidad de evitar la creación de barreras que supongan un obstáculo para la permeabilidad del territorio a los desplazamientos de la fauna, sin incrementar la fragmentación de hábitats y favoreciendo corredores ecológicos seguros.

Las nuevas infraestructuras deben contemplar la necesidad de evitar la creación de barreras que supongan un obstáculo para la permeabilidad del territorio a los desplazamientos de la fauna, sin incrementar la fragmentación de hábitats y favoreciendo corredores ecológicos seguros

Imagen 14. Redes viarias asociadas al Bilbao metropolitano. Fuente: Plan Director de Carreteras. DFB



Cobra especial interés, por su repercusión tan negativa, la ocupación del suelo por parte de nuevas infraestructuras. Este hecho debería forzarnos, y teniendo en cuenta el objetivo a largo plazo —2050— de ocupación neta cero de suelo establecido por la nueva Estrategia de protección del suelo de Euskadi 2030, a priorizar el aprovechamiento de las infraestructuras existentes en detrimento de un aumento de oferta viaria o nuevas ocupaciones de suelo.

El efecto Isla de Calor también es potenciado por las infraestructuras llegando a elevar la temperatura localmente entre 2 y 4 grados. Este impacto tiene difícil corrección al no poder generar sombreos por vegetación en gran parte de los trazados. No obstante, se deben realizar nuevas propuestas para minimizar este impacto ya que también forma parte del calentamiento global y afecta a la calidad de vida tanto de la especie humana como de la fauna. También parece necesario revertir los impactos más significativos generados en periodos con una menor sensibilidad ambiental, regenerando las profundas cicatrices ambientales que han quedado en el territorio tan antropizado.

Para garantizar la inclusión de todas estas mejoras, la legislación vigente contempla un procedimiento reglado y garantista de evaluación del impacto ambiental de las infraestructuras de transporte, a través del cual se fomenta la participación de los agentes sociales en diferentes fases del proceso, desde las más iniciales de concepción de la actuación (Consultas Previas) hasta la fase final de definición de la misma (Información Pública). Estos trámites terminan con la emisión de una Declaración de Impacto Ambiental por parte del órgano ambiental, documento vinculante y de obligado cumplimiento.

En este contexto, la bioingeniería, como disciplina basada en la naturaleza, puede contribuir de una manera muy significativa en la restauración fluvial en todas aquellas obras donde se producen interferencias con arroyos y ríos, o bien, en zonas adyacentes a las vías, donde se produce fragmentación de hábitats y es necesario estabilizar, restaurar y naturalizar las intervenciones realizadas.

3.2.3 Problemática asociada a las carreteras

El Territorio Histórico de Bizkaia presenta una serie de condicionantes para el desarrollo de las infraestructuras viarias:

- Una geomorfología de valles con orografía de pendientes medias a fuertes, y litologías con limitaciones o desfavorables geotécnicamente.
- Una hidrografía ampliamente desarrollada y en ocasiones muy encajada, con zonas inundables.
- Una limitación de espacio de ocupación de suelos marcada por expropiaciones que se ajustan a las necesidades funcionales de las obras.
- Presencia de un elevado número de suelos inventariados como potencialmente contaminados.
- Presencia de zonas con elementos protegidos, bien de patrimonio arquitectónico, zonas de interés natural, o zonas protegidas del dominio público hidráulico.
- Presencia de zonas densamente pobladas, con ocupaciones de propietarios muy fraccionadas.

La Bioingeniería del Paisaje puede contribuir de una manera muy significativa en la restauración fluvial en todas aquellas obras donde se producen interferencias con arroyos y ríos, o bien, en zonas adyacentes a las vías, donde se produce fragmentación de hábitats y es necesario estabilizar, restaurar y naturalizar las intervenciones realizadas

Entre las consecuencias más relevantes se produce la fragmentación de hábitats, e íntimamente relacionado, se da el efecto barrera para la fauna

Cobra especial interés tanto en la **Agenda de Estado para la Regeneración Estructural (estado)** como para la **Agenda de Estado funcional (servicio)** la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza, como las técnicas de bioingeniería, que ayuden y contribuyan a reducir la huella de carbono de nuestras infraestructuras. Caminamos hacia un futuro en el ámbito de la construcción donde cuenta tanto el cómo hacer como el modo de construir, donde todos los interlocutores tienen que velar por lograr los objetivos ambientales.

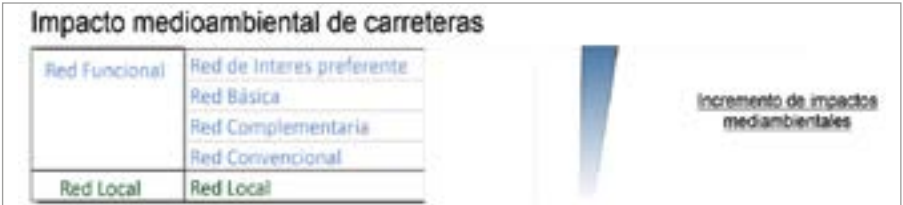


Imagen 15. Incremento de impactos ambientales según categoría de vía. Aquellas carreteras con una mayor entidad muestran un mayor impacto medioambiental

3.2.3.1 Fragmentación de hábitats y efecto barrera para la fauna

Como ya se ha comentado, entre las consecuencias más relevantes se produce la fragmentación de hábitats, e íntimamente relacionado, se da el efecto barrera para la fauna.

Más allá del beneficio derivado del cada vez más eficaz transporte de personas y mercancías, la vasta y densa red de vías de transporte de Bizkaia, territorio que cuenta con alrededor de 230 especies de animales, ha originado la emigración e incluso la muerte de diversas especies animales. Todo ello por el efecto barrera que estas infraestructuras causan, tanto en hábitats terrestres como fluviales, sobre las poblaciones que habitan en las áreas atravesadas por los viales.

Imagen 16. Efecto barrera e impacto visual de las infraestructuras viarias



Imagen 17. Barreras en los ríos de Bizkaia. (Icarus Estudio Medioambientales. Identificación de los puntos de fragmentación de ríos por infraestructuras. 2014. Diputación Foral de Bizkaia)

En lo que a entornos fluviales se refiere, el trabajo Identificación de los puntos de fragmentación de ríos por infraestructuras (Icarus Estudios Medioambientales – Diputación Foral de Bizkaia, 2014) presenta y clasifica las barreras que fragmentan los ríos de Bizkaia a través del estudio de especies como el visón europeo y la nutria euroasiática, que se caracterizan por utilizar los ríos como vías de desplazamiento. En este sentido, de las 468 barreras fluviales identificadas en todo el Territorio Histórico de Bizkaia, el 67 % son definidas como ‘leves’, el 12 % ‘moderadas’ y el 21 % restante obtienen la calificación de barrera ‘total’.

Si bien es cierto que no todas las barreras analizadas en el estudio están asociadas a carreteras y que algunas responden a infraestructuras acuáticas, las carreteras son importantes impedimentos para el libre desplazamiento fluvial de animales, siendo la BI-2701, BI-636, BI-2235 y la N-634, todas ellas con 5 o más barreras de categoría ‘total’, las que más problemas de este tipo presentan.

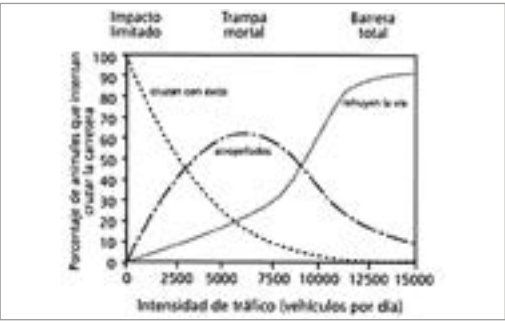


Imagen 18. Relación entre la intensidad del tráfico y el efecto barrera de la carretera. (Luell et al. COST 341. Fragmentación del hábitat causada por las infraestructuras de transporte)

En el ámbito terrestre, por su parte, el atropello de fauna es uno de los impactos principales de las infraestructuras de transporte y es ocasionado, entre otros, por el efecto barrera que genera la carretera. Existe una estrecha relación entre la intensidad de tráfico y el porcentaje de animales que tratan de cruzar la carretera, así, cuando la intensidad es media y un porcentaje de animales medio intenta cruzar, es cuando se origina el mayor número de atropellos. En cambio, con altos volúmenes de tráfico el número de animales ahuyentados aumenta mientras que el de atropellados disminuye.

El atropello de fauna es uno de los impactos principales de las infraestructuras de transporte y es ocasionado, entre otros, por el efecto barrera que genera la carretera

La Diputación Foral de Bizkaia, consciente de la problemática asociada con el efecto barrera, está impulsando la instalación de pasos de fauna que minimicen este impacto

En el contexto del estudio de Mejora de la permeabilidad para la fauna de la Red de Carreteras de Bizkaia y diseño de corredores ecológicos (IDOM – Diputación Foral de Bizkaia, 2019), se digitalizaron los atropellos de fauna entre el año 2008 y 2017. De dicho proceso, en el que se analizaron total de 3.821 atropellos (1.991 animales salvajes, 1.637 animales domésticos y 192 desconocidos), se obtiene que el número de accidentes registrados se ha visto incrementado, pasando de 160 en 2008 a más de 600 en 2017.

La modelización a través del método Kernel de los avisos señala a Zalla-Balmaseda (1), Güeñes (2), Gumuzio – Larrabetzu (3), Urdaibai (4) y Ubide (5) como las cinco zonas críticas de alta densidad de atropellos en el Territorio Histórico de Bizkaia (imagen 19).

La Diputación Foral de Bizkaia, consciente de la problemática asociada con el efecto barrera, está impulsando la instalación de pasos de fauna que minimicen este impacto tan negativo (imagen 20). Por una parte, están realizando trabajos de habilitación de pasos de fauna (imagen 22) en infraestructuras existentes que presentan puntos negros por atropellos de fauna, y por otra, en todos

Imagen 19. Mapa de densidad Kernel a partir de los datos de atropellos registrados a fauna salvaje no ave en Bizkaia. Los colores marcan de una forma no paramétrica la densidad de atropellos (verde baja densidad de atropellos; rojo densidad muy alta). IDOM. Mejora de la permeabilidad para la fauna de la Red de Carreteras de Bizkaia y diseño de corredores ecológicos. 2019. Fuente: Diputación Foral de Bizkaia

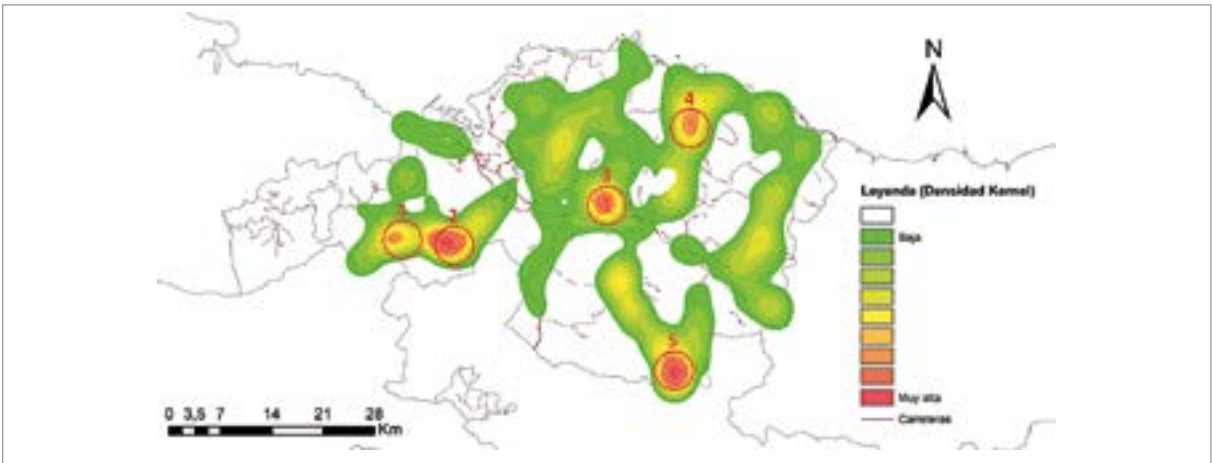


Imagen 20. Diferentes tipos de vallado para especies cinegéticas



los diseños de nuevos proyectos se incluyen las medidas necesarias para facilitar la migración de animales, incluyendo barreras específicas de guiado de animales a los pasos de fauna habilitados (imagen 21).

Cada vez son más los departamentos que emplean técnicas de bioingeniería del paisaje para resolver sus intervenciones reduciendo el impacto global y consiguiendo una integración óptima con el medio. Necesitamos promover un cambio de paradigma, ya que el modelo que definamos ahora será determinante para el transporte de 2050.

3.2.3.2 Interferencias de obras lineales con el medio fluvial

La contribución de las técnicas de bioingeniería en la restauración de las zonas donde las obras lineales interfieren con los diferentes tipos de cauces esposiblemente, el campo más trabajado y donde su aplicación es vital para una adecuada restauración fluvial.

Su profusa aplicación en actuaciones de restauración del medio fluvial se debe a que son técnicas que potencian la regeneración natural por el empleo de materiales vivos donde todos los elementos presentan una dinámica de regulación propia hasta alcanzar un equilibrio dinámico (P. Sangalli 2019, Bioingeniería fluvial).

La importancia de naturalizar los cauces y riberas fluviales, además de estabilizar los diferentes tipos de inestabilidades geotécnicas y generar elementos para la protección hídrica, radica en la necesidad de mantenerlos como importantes corredores ecológicos generando hábitats para la fauna silvestre. Por estos motivos, cualquier actuación, tanto en cauce como en el talud de ribera, debe restaurar este espacio natural. Estas transiciones entre obra lineal y el medio natural colindantes son una oportunidad de regeneración de zonas que se encuentran fuertemente modificadas y antropizadas.

Imagen 21. Ejemplos de barreras de guiado de fauna. Corredor del Kadagua, Zalla. Fuente: DFB



Imagen 22. Ejemplos de diferentes tipos de pasos de fauna. Carretera Arcentales, tramo Malabrigo. Fuente: DFB



La importancia de naturalizar los cauces y riberas fluviales, radica en la necesidad de mantenerlos como importantes corredores ecológicos generando hábitats para la fauna silvestre



4. BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE EN INFRAESTRUCTURAS LINEALES



Imagen 23. Ejemplos de taludes en carreteras con entramados y enrejados vivos de madera (Biella-Italia). Fuente: Alpivert

4.1 DEFINICIÓN, OBJETIVOS, ÁMBITOS DE APLICACIÓN
E HISTORIA DE LA BIOINGENIERÍA

De acuerdo con la Federación Europea de Bioingeniería (EFIB), la Bioingeniería del Paisaje es una disciplina específica de la Ingeniería orientada por la biología, en la que plantas autóctonas y fragmentos vegetales se emplean como material de construcción vivos para resolver problemas de erosión y conservación del suelo, contribuyendo a la regeneración de ecosistemas degradados por causas naturales o antrópicas, a la dinámica de los procesos ecológicos y geomorfológicos y a la recuperación de la Biodiversidad.

La Bioingeniería del Paisaje comprende una serie de técnicas que utilizan tanto material vegetal vivo como elementos de construcción, solos o combinados con materiales inertes, dentro del campo de la restauración ambiental. La Bioingeniería del Paisaje o bioingeniería se utiliza en todos los ámbitos de obra civil, especialmente en el ámbito de consolidación de taludes (imagen 23), riberas y para el control de la erosión.

El nombre proviene del término alemán ‘Ingenieurbiologie’ y en castellano se traduce como Bioingeniería del Paisaje.

Esta disciplina persigue objetivos técnicos —de control de erosión o de estabilización del suelo— ecológicos —de restauración de ecosistemas—, paisajísticos —de integración y mitigación de las obras en el paisaje— y socioeconómicos —de empleo de materiales locales y de trabajo local y verde—.

En la fase inicial, a menudo se requiere una combinación con otros materiales que asumen inicialmente la función de estabilidad, hasta que la componente vegetal pueda desarrollar plenamente su función de crecimiento (imagen 24).

Los ámbitos de aplicación de la bioingeniería del paisaje comprenden diversas áreas, como intervenciones geotécnicas y mecánica de suelos en taludes y laderas, en cursos fluviales, en humedales, en costas, en zonas forestales y en zonas con intervenciones constructivas, actividades extractivas, vertederos, infraestructuras lineales, urbanizaciones, etc. Estas intervenciones buscan un equilibrio entre las necesidades humanas y la preservación los sistemas naturales.

La Bioingeniería del Paisaje tiene su origen en la conjunción de técnicas forestales con técnicas de ingeniería tradicional. Ha sido desarrollada principal-

mente en Centro Europa: Austria, Suiza, Alemania y en menor medida Italia y Francia, países que, formando parte del Arco Alpino, tienen una tradicional sensibilidad por el mantenimiento del entorno natural y tratan de regenerar los impactos producidos por sus grandes obras mediante técnicas que activen o potencien la regeneración natural. No se trata de una disciplina que sustituya a la ingeniería clásica, pero, sin embargo, hay que entenderla como un elemento necesario y complementario en las obras de ingeniería convencional.

Está suficientemente documentado que una capa de plantas actúa como protección contra la erosión del suelo, mientras que la ausencia de vegetación acelera los procesos erosivos (Schiechtl, 1993). El uso de plantas como material para estabilizar el suelo está frecuentemente asociado al empleo de materiales inertes, secundarios, cuya finalidad es ayudar a establecer unas condiciones físicas en las primeras fases, cuando todavía el material vegetal no ha llegado a su efectividad óptima (Lovejoy, 1993).

Muchas de las técnicas que forman parte de la bioingeniería del paisaje son conocidas en la península (hidrosiembras, utilización de mantas orgánicas, muros verdes), pero hay numerosas técnicas con gran posibilidad de aplicación que resultan menos conocidas (lechos de ramaje, entramados de madera, peldaños de leña y roca, fajas drenantes, trenzados de mimbre). Existen hasta más de ciento cincuenta técnicas distintas que forman parte de esta disciplina.

4.1.1 Objetivos y funciones

Según H.M. Schiechtl, la bioingeniería cumple diversas funciones: técnicas, ecológicas, paisajísticas y económicas. Las funciones principales de la bioingeniería son las siguientes:

1. FUNCIONES TÉCNICAS

Las funciones técnicas se refieren a la protección y la estabilización del suelo mediante el sistema radical:

- Protección de la superficie del suelo contra la erosión debido al viento, las precipitaciones y al hielo.

Imagen 24. Ejemplo del empleo de madera en las técnicas hasta el desarrollo de la vegetación



No se trata de una disciplina que sustituya a la ingeniería clásica, pero, hay que entenderla como un elemento necesario y complementario en las obras de ingeniería convencional

La Bioingeniería del Paisaje comprende una serie de técnicas que utilizan tanto material vegetal vivo como elementos de construcción, solos o combinados con materiales inertes, dentro del campo de la restauración ambiental



Imagen 25. Integración paisajística con técnicas de bioingeniería en túnel. Fuente: P. Cornellini

- Protección contra la caída de piedras y aludes.
- Estabilización en profundidad del suelo.
- Eliminación y absorción de fuerzas mecánicas.
- Disminución de la velocidad de la corriente en los cauces.
- Agregación y estabilización superficial y/o profunda del suelo.
- Drenajes.
- Protección contra el viento.
- Favorecer la acumulación de nieve y arenas para reducir el arrastre de materiales.
- Aumento de la rugosidad del terreno.

2. FUNCIONES ECOLÓGICAS

Las funciones ecológicas difícilmente se pueden integrar en actuaciones de la ingeniería clásica. Debido a esto, las intervenciones de bioingeniería están cobrando cada vez más importancia; ya que, favorecen la introducción de la vegetación y modifican las características ecológicas de la zona, tales como:

- Mejora del balance hídrico por un aumento de la interceptación, mejora en la capacidad de retención de agua del suelo y mejora del consumo de agua por las plantas.
- El desarrollo de asociaciones vegetales más estables pertenecientes a las series de vegetación de la zona, en especial el empleo de especies autóctonas que contribuyen a acelerar la recuperación del ecosistema original.
- Drenaje del suelo.
- Protección contra el viento.
- Protección contra inmisiones.
- Desagregación mecánica del suelo por las raíces de las plantas.
- Compensación de las condiciones de temperatura en la zona subárea y en el suelo.
- Sombreado.
- Mejora de la cantidad de nutrientes en el suelo y por consiguiente aumento de la fertilidad de suelos pobres.

Las funciones ecológicas son funciones primordiales de la bioingeniería del paisaje, estando al mismo nivel que las soluciones técnicas

- Protección contra el ruido.
- Aumento de la productividad en áreas agrarias cercanas.

3. FUNCIONES PAISAJÍSTICAS

Encaminadas a la mejora del paisaje, siendo algunos de estos objetivos:

- Restauración de cicatrices en el paisaje causadas por episodios catastróficos o por las actividades humanas (minería, obra pública, escombreras de inertes, escombreras mineras, vertederos de residuos industriales y urbanos).
- Integración de obras y construcciones en el paisaje (imagen 25).
- Pantalla visual para la ocultación de diferentes infraestructuras de fuerte impacto visual.
- Enriquecimiento de los paisajes mediante la creación de focos visuales y nuevas estructuras, formas y colores en la vegetación.

4. FUNCIONES SOCIOECONÓMICAS

Las obras de bioingeniería no son siempre más baratas que las obras de ingeniería clásica. Pero teniendo en cuenta la durabilidad de estas obras, incluyendo los trabajos de mantenimiento, las obras de bioingeniería normalmente son más económicas. Las ventajas más relevantes son:

- Ahorro de costes comparado con las técnicas tradicionales de construcción, aunque este punto no siempre se cumple.
- Ahorro de costes de mantenimiento y saneamiento.
- Empleo de materiales locales cercanos a la propia obra. Km 0 . Fuente: de empleo local.

El resultado de las obras de bioingeniería son sistemas vivos basados en la sucesión natural; es decir, que permanecen en equilibrio mediante una autorregulación dinámica sin necesidad de aporte de energía artificial.

Eligiendo bien las técnicas, así como los materiales vivos e inertes, se obtiene una persistencia extraordinaria con gastos de mantenimiento de poca consideración.

Imagen 26. Cursos de formación. Fuente: D. Arizpe - J. Bosch (AEIP)



Las técnicas de bioingeniería emplean materiales locales, cercanos a la propia obra. Son técnicas Km 0 y una fuente de empleo local

Las técnicas de bioingeniería se pueden aplicar en todos aquellos lugares donde la vegetación puede desarrollarse. Prácticamente en todo el mundo, excepto en desiertos y en los polos

El éxito del establecimiento de la cubierta vegetal en las obras de restauración depende de diversos tipos de factores:

- **Factores medioambientales** (climáticos, edáficos y bióticos). Es necesario conocerlos, saber cómo, cuándo y dónde deben ser introducidos para tener éxito en la implantación de la vegetación. Determinarán en gran medida las características de las especies a utilizar.

- **Factores constructivos.** Las operaciones derivadas de la construcción de infraestructuras tienen un impacto significativo tanto en el medio natural como en las actividades necesarias para establecer la vegetación. Por lo tanto, es preciso detenerse y describir la nueva situación en la que se debe actuar. Esta nueva situación incluye los cambios en el suelo debido a los movimientos de tierras o la necesidad de plantar en momentos que no siempre coinciden con la época de ejecución de las obras.

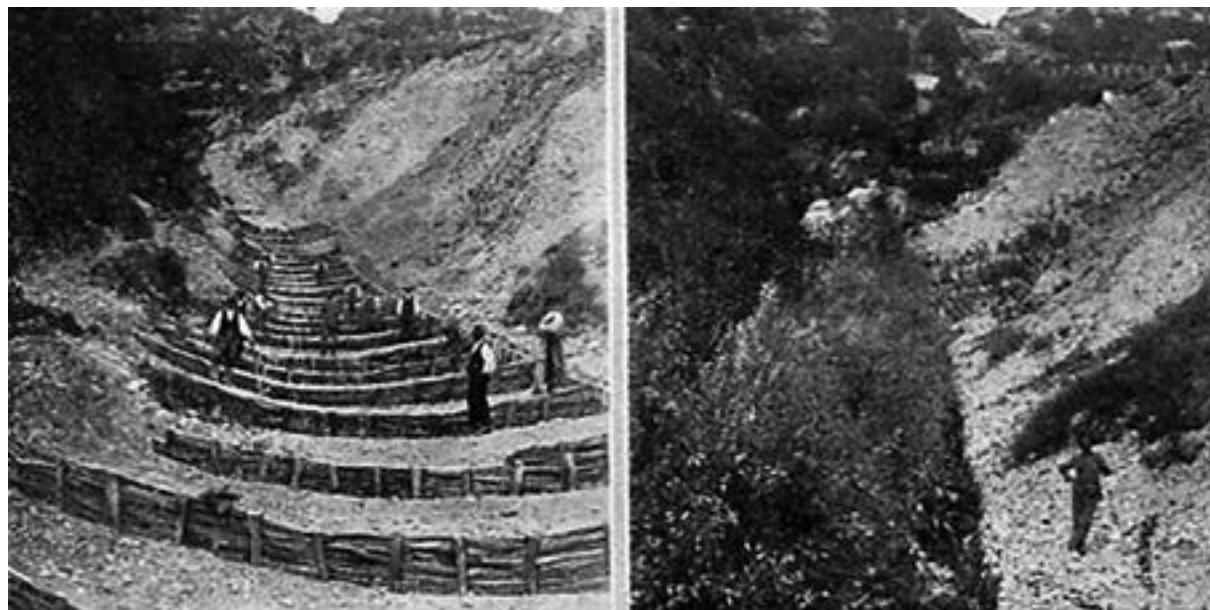
- **Factores productivos, comerciales y de calidad.** Las especies elegidas para realizar la restauración deben encontrarse en el mercado en el tamaño, número y calidad necesarias para la restauración.

Las especies a utilizar en la recuperación dependerán en gran medida de estos factores y del medio en el que debamos actuar. En medio natural lo aconsejable es la utilización de especies autóctonas, más acordes con el paisaje y con mejor adaptación; sin embargo, cuando la actuación se realice en ambientes urbanos, puede ser más aconsejable entrar en variedades ornamentales que mejor se adapten a las características del medio.

4.1.2 Ámbitos de actuación

Las técnicas de bioingeniería se pueden aplicar en todos aquellos lugares donde las plantas que se utilizan como material vivo constructivo puedan crecer bien: en las zonas templadas, subtropicales y tropicales. Los límites claros son las zonas climáticas frías, áridas y semiáridas.

Imagen 27. Actuaciones de restauración hidrológico forestal. Finales siglo XIX



En Europa, los umbrales de aridez pueden aparecer ocasionalmente en el este de la región mediterránea, así como en las áreas nivales alpinas interiores y de Europa del Este. Mucho más frecuentes son los umbrales de frío alpinos y árticos, reconocibles en la zona límite de la vegetación arbórea y en los límites latitudinales de las praderas densas. Cuanto más pobre en especies es una región, tanto más limitada es la aplicación en estas zonas de las técnicas de la bioingeniería.

Estas técnicas hoy en día tienen más utilidad que en el pasado, cuando solo se empleaban en las zonas de montaña. En la actualidad, con los cambios en los modelos económicos, y con una mayor sensibilidad hacia los temas ambientales y en términos generales de calidad de vida, la bioingeniería tiene un gran campo de intervención en el paisaje y en la defensa del medio ambiente.

Estos ámbitos de aplicación son:

- Reconstrucción de ambientes húmedos, zonas costeras, márgenes fluviales y embalses.
- Intervenciones en áreas montañosas, principalmente en la recuperación de desprendimientos, estabilidad de laderas y pistas de esquí.
- Recuperación de obras públicas, autopistas, gaseoductos y vías férreas.
- Renaturalización de minas, canteras, escombreras, y vertederos.
- Tratamientos post incendio.

4.1.3 Breve historia de estas técnicas

El origen de las técnicas de bioingeniería del paisaje se sitúa en torno a la Edad Media, época en la que las técnicas constructivas eran de tipo empírico, basadas en la experiencia y en la observación de los resultados, y en donde los únicos elementos constructivos que existían eran las piedras y la madera. La sujeción de deslizamientos, caminos y terrenos erosionados por arroyos, aludes y cárcavas se efectuaba con estos materiales y su combinación con plantas vivas.

A finales del siglo XVIII se tiene constancia de las primeras obras publicadas que hacen referencia a la Bioingeniería del Paisaje como disciplina. Esto permite establecer el origen de estas técnicas en la Europa Alpina, particularmente en Austria y Suiza. En el año 1886 se publicó una obra recopilatoria titulada “Estabilización de las Riberas de nuestros Ríos y Desprendimientos de Tierras” (Robert Lauterburg). Durante el siglo XIX e inicios del XX estas técnicas se aplicaron principalmente en obras de restauración hidrológico-forestal (imagen 27), pero la aparición de nuevas técnicas y materiales, sobre todo el hormigón, hizo que las técnicas de Bioingeniería del Paisaje quedaran relegadas al ámbito rural y forestal de la zona centroeuropea y perdieran relevancia a favor de estas últimas.

En la década de los 30 del siglo XX, se sufrió una de las crisis económicas más graves de Europa Occidental, esto permitió que muchas de las técnicas de bioingeniería se rescataran debido a su bajo coste. En la Alemania anterior a la segunda guerra mundial, se integraron en la ingeniería de ríos y autopistas, y en 1936 se creó un centro oficial para investigación en Bioingeniería del Paisaje. En una época de fuerte recesión, los deslizamientos, la erosión de los torrentes, las avalanchas y los aludes necesitaban técnicas artesanales baratas, con materiales disponibles in situ, de manera inmediata y a un coste mínimo. Fueron los operadores forestales pertenecientes a la Administración Pública los que empezaron a experimentar, va-

El origen de las técnicas de bioingeniería del paisaje se sitúa en torno a la Edad Media, época en la que las técnicas constructivas eran de tipo empírico, basadas en la experiencia y en la observación de los resultados

lorar, codificar y consolidar algunas tipologías y criterios de intervención basados en la utilización de material vivo (plantas) y /o natural (madera, piedras).

Las investigaciones científicas de los últimos cincuenta años, la incorporación de nuevos materiales industriales y la evolución de los criterios y capacidades técnicas han llevado a la consolidación científica de la bioingeniería del paisaje. Estos avances, junto con nuevas demandas sociales y culturales, y un cambio en la escala de valores, especialmente con la emergente conciencia ambiental, así como sus posibilidades de intervención en la mitigación frente a la emergencia climática, han convertido a esta disciplina en un instrumento operativo. No solo se utiliza para el control de la erosión, sino también para protección del ambiente natural y la restauración ecológica. Se ha pasado de la actuación empírica de la agricultura de montaña, centrada exclusivamente en la defensa del suelo, a la potencialidad de estas técnicas en el campo general de la defensa del paisaje y del medio ambiente, como una efectiva solución basada en la naturaleza.

4.2 EL ENFOQUE Y LA ESTRATEGIA EN LA OBRA DE BIOINGENIERÍA.
FASES DE LA VIDA DE SERVICIO DE LA OBRA DE BIOINGENIERÍA

La bioingeniería comprende una serie de técnicas que utilizan material vegetal vivo, solo o combinado con materiales inertes, como material de construcción dentro del campo de la restauración ambiental (Schiechtel, 1980). La bioingeniería fluvial y del suelo son herramientas sostenibles para mejorar la resiliencia contra la pérdida y degradación del suelo (Schiechtel & Stern, 1996).

De acuerdo con la estrategia y filosofía de las obras de bioingeniería, los materiales que inicialmente aportan rigidez y estabilidad a la ladera irán paulatinamente cediendo su función estabilizadora a la vegetación en desarrollo. El objetivo final perseguido es que la vegetación sea el principal y/o único agente responsable de la estabilidad y refuerzo de la zona de intervención. Los materiales biodegradables en esta última fase de la vida de servicio de la obra ya se habrán deteriorado y cumplirán exclusivamente una función de aporte de nutrientes (por ejemplo, madera en descomposición, manta orgánica deteriorada, etc.).

Durante la vida de servicio de una obra de bioingeniería, sus principales cambios se deben a dos razones. Por un lado, los materiales vegetales inertes utilizados suelen ser biodegradables (madera, troncos, mantas orgánicas, mallas orgánicas, biorrollos, etc.) con lo que sus propiedades van cambiando progresivamente con el paso del tiempo (la resistencia mecánica de estos materiales disminuye). Por otro lado, la vegetación va desarrollando su parte aérea y subterránea aumentando con el tiempo su capacidad de refuerzo y estabilización del terreno (Tardío et al., 2018).

Por tanto, incorporar y reflejar la componente temporal en el análisis y diseño de una obra de bioingeniería permite generar metodologías de cálculo más realistas y ajustadas a este tipo de intervenciones.

En los siguientes epígrafes se explica la Metodología Tardío & Mickovski (Tardío & Mickovski, 2023), aceptada tanto en el mundo académico internacional como en el mundo profesional, que incorpora las particularidades de las obras de bioingeniería en su diseño y cálculo. Dicha metodología permite incluir en el proceso de diseño de las obras de bioingeniería los siguientes puntos y procesos:

- Definición de una estructura temporal de hitos de comprobación para el análisis a corto y largo plazo.
- Avance y efectos de los procesos de deterioro de la madera en las comprobaciones de estabilidad.
- Desarrollo de los efectos de refuerzo y estabilización de los sistemas radicales de la vegetación en desarrollo. Incorporación de dicho refuerzo en las comprobaciones de estabilidad a largo plazo de las obras de bioingeniería.
- Incorporación integrada y articulada de los anteriores procesos en el diseño y cálculo a corto y largo plazo de las obras de bioingeniería.

4.2.1 Procesos de deterioro de la madera

La definición óptima de los procesos de deterioro de la madera en una determinada zona de intervención se consigue a partir de la utilización de datos experimentales que podamos extrapolar a nuestra situación. Algunos organismos de investigación cuentan con datos sobre la durabilidad natural de distintos tipos de madera (por ejemplo, AITIM - Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera) y para distintas clases de servicio. Aparte, existen experimentos (imagen 28) e información sobre la vida de servicio de algunas estructuras de madera expuestas a la intemperie (por ejemplo, pérgolas, postes telefónicos, vallados, etc.). Los trabajos de seguimiento de obras de bioingeniería también aportan una información muy valiosa sobre los procesos de deterioro de la madera.

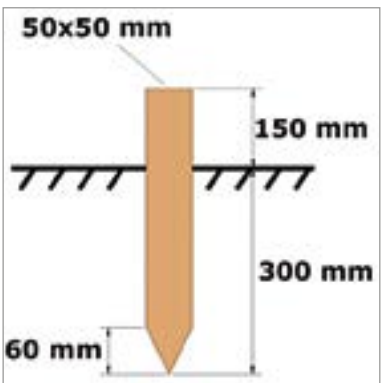


Imagen 28. Dimensiones de estacas utilizadas en experimentos para analizar los procesos de deterioro y pudrición de la madera en contacto directo con el suelo (Adaptado de Leicester et al., 2003)

En el caso de las obras de bioingeniería, la madera está en contacto directo con el suelo y, en general, no suele estar tratada con compuestos químicos que mejoren su durabilidad. En caso de no disponer de datos experimentales ni de información de instituciones u organismos públicos o privados, un método para caracterizar la evolución de los procesos de deterioro de la madera es el modelo de Leicester et al. (2003) (imagen 28).

Por la experiencia acumulada, este método arroja resultados conservadores lo cual permite diseños del lado de la seguridad (Tardío & Mickovski, 2016; Bischetti et al., 2021). En este modelo, la ecuación que expresa la tasa de avance de los procesos de deterioro de la madera es la siguiente:

$$r = k_{MADERA} \cdot k_{CLIMA}$$

La definición óptima de los procesos de deterioro de la madera en una determinada zona de intervención se consigue a partir de la utilización de datos experimentales que podamos extrapolar a nuestra situación

Incorporar y reflejar la componente temporal en el análisis y diseño de una obra de bioingeniería permite generar metodologías de cálculo más realistas y ajustadas a este tipo de intervenciones

Dado el rango de los diámetros utilizados en las obras de bioingeniería (entre 10-30 cm), la presencia de madera juvenil será importante, lo cual implica también una mayor presencia de la madera de albura

Donde:

r = tasa de avance de los procesos de deterioro de la madera (mm/año).

K_{MADERA} = coeficiente que depende del tipo de madera (albura o duramen) y la durabilidad natural de la especie arbórea de la que procede la madera.

K_{CLIMA} = coeficiente que depende de la precipitación anual media, la temperatura anual media y el número de meses secos de la zona donde se vaya a utilizar la madera.

Para los anteriores coeficientes, en Leicester et al. (2003), existen datos tabulados y un mayor detalle de su determinación y cálculo.

Cabe señalar que la madera de albura se deteriora más rápidamente que la de duramen debido a su mayor contenido en humedad. Dado el rango de los diámetros utilizados en las obras de bioingeniería (entre 10-30 cm), la presencia de madera juvenil será importante, lo cual implica también una mayor presencia de la madera de albura. Debido a esta situación, el valor de r (mm/año) utilizado debe corresponder a la madera juvenil (de esta manera, además, los resultados estarán del lado de la seguridad).

A continuación, se incluyen las expresiones de los coeficientes para el cálculo de K_{CLIMATE} para el caso de la provincia de Bizkaia:

$$K_{\text{CLIMATE}} = f(P_{\text{MEDIA}})^{0.3} \cdot g(T_{\text{MEDIA}})^{0.2}$$

Donde:

$$f(P_{\text{MEDIA}}) = 10 \cdot [1 - e^{-0.001(P_{\text{MEDIA}} - 250)}]$$
$$g(T_{\text{MEDIA}}) = -1 + 0.2 \cdot T_{\text{MEDIA}}$$

P^{MEDIA} = precipitación media anual de la zona de intervención.

T^{MEDIA} = temperatura media anual de la zona de intervención.

Por otro lado, los procesos de deterioro no comienzan en el momento justo de colocar la madera en obra. El tiempo transcurrido hasta que los procesos de deterioro se activan se denomina tiempo de retardo (t_0). En el modelo de Leicester et al. (2003), el tiempo de retardo (t_0) se estima a partir de la siguiente fórmula (Wang et al., 2007):

$$t_0 = 5.5 \cdot r^{-0.95}$$

En este método se supone que la sección no afectada por los procesos de deterioro mantiene el valor original de sus propiedades mecánicas. La pérdida de sección, desde el punto de vista mecánico, se puede calcular a partir de la estimación de la parte del radio de la pieza afectada por los procesos de deterioro.

$$d_t = r \cdot (t - t_0)$$

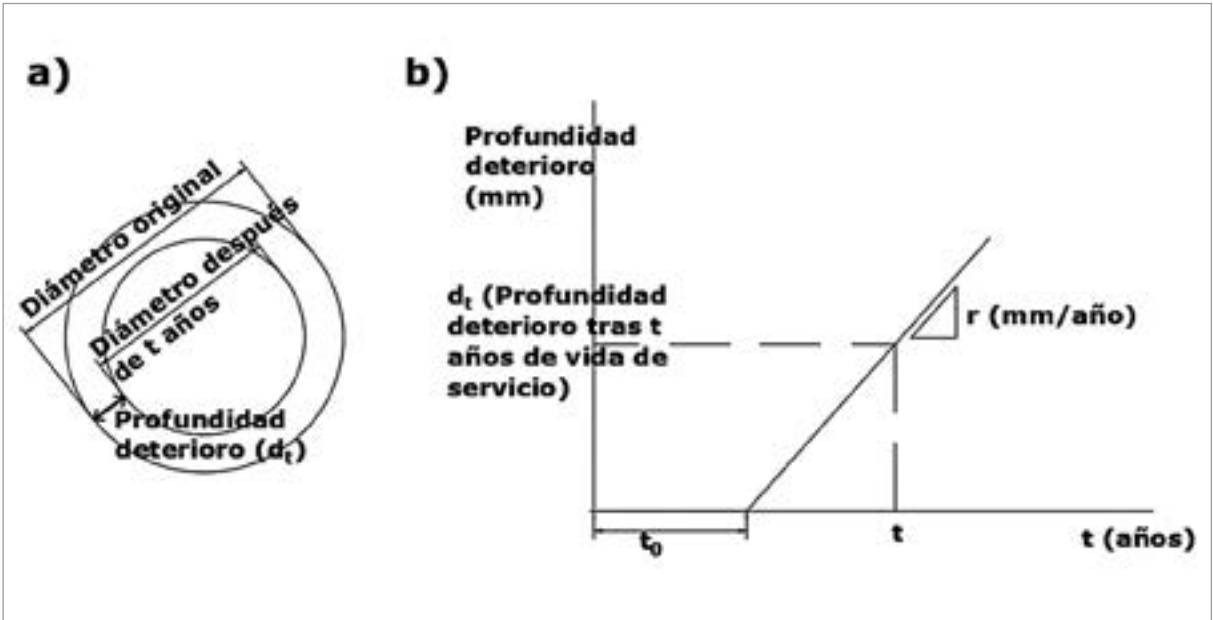


Imagen 29. a) Cambios en el diámetro y profundidad de deterioro; b) avance de los procesos de deterioro mostrando el significado de las variables del modelo (Adaptado de Tardío & Mickovski, 2016)

dt = profundidad (parte del radio) afectada por los procesos de deterioro (mm) tras t años (tras la finalización de las obras). La parte del diámetro afectada será igual a $2dt$.

A partir del valor de dt se puede obtener el módulo resistente residual (WR):

$$W_R = \frac{\pi}{32} (D - 2d_t)^3$$

Donde WR es el módulo resistente residual de la sección circular del tronco de madera y D es el diámetro inicial del elemento de madera. En la metodología Tardío & Mickovski, las comprobaciones de estabilidad interna (a flexión y a cortante) tienen en cuenta las pérdidas de diámetro de las piezas en el cálculo de las solicitaciones y el cálculo de las secciones eficaces.

El anterior modelo puede ajustarse y alcanzar niveles de mayor complejidad. Por ejemplo, se puede obtener una gráfica de la variación de la tasa de deterioro para cada tipo de madera (albura y duramen) y comprobar si la profundidad afectada tras t años de la vida de servicio se mantiene dentro de la zona de albura o, por el contrario, entra en la zona de duramen.

Como ya se ha comentado, el anterior modelo arroja valores conservadores en términos del diseño de la obra de bioingeniería. La metodología Tardío & Mickovski permite tanto la incorporación de los procesos de deterioro de la madera como el efecto de refuerzo del material vivo utilizado.

Tal y como se desarrollará en otros capítulos de la presente guía, dicho refuerzo se podrá estimar a partir de los distintos métodos disponibles (p.ej., Wu et al., 1979; Gray & Leiser, 1983; Schwarz et al., 2010; Tardío & Mickovski, 2015). Una explicación de este tipo de modelos se puede encontrar en Norris et al. (2008).

La metodología Tardío & Mickovski permite tanto la incorporación de los procesos de deterioro de la madera como el efecto de refuerzo del material vivo utilizado



Imagen 30. Troncos de un entramado de madera en fase de descomposición muy avanzada (río Artia, Irún). Las raíces de la vegetación ocupan el espacio anteriormente utilizado por los troncos y absorben sus nutrientes. Fuente: G. Tardío.

4.2.2 Fases e hitos temporales de la metodología Tardío & Mickovski

Una metodología realista de diseño y cálculo de una obra de bioingeniería debe ser capaz de incluir los procesos de cambio de los materiales utilizados (vivos e inertes) a lo largo de su vida de servicio. Existen tres momentos bien diferenciados en el funcionamiento conjunto de una obra de bioingeniería del paisaje (Tardío & Mickovski, 2023; Bischetti et al., 2021):

- **FASE 1:** durante la cual las labores de refuerzo y estabilización están desarrolladas principalmente por los materiales inertes (naturales y/o manufacturados) empleados en la obra.
- **FASE 2:** en la cual la vegetación ya ha alcanzado un buen grado de desarrollo y cobertura y los materiales inertes son capaces todavía de asegurar la estabilidad externa e interna del sistema. Existe, por tanto, una colaboración en las labores de estabilización entre los materiales inertes y la vegetación en desarrollo.
- **FASE 3:** durante la cual la vegetación es ya el principal agente estabilizador de la zona de intervención. Los materiales inertes pueden seguir desarrollando alguna función residual de refuerzo aun cuando en esta fase ya no sea necesaria. Los elementos de madera funcionan ahora como un abono de liberación lenta que nutre a la vegetación en desarrollo (imagen 30).

La anterior estructura de fases necesita de la definición de un marco temporal que permita calcular las pérdidas de sección, las pérdidas de propiedades mecánicas de los elementos de madera y los efectos de refuerzo de la vegetación. También se han redefinido, desde el punto de vista del diseño y el cálculo de la obra, los elementos principales a tener en cuenta en las anteriores fases.

Se propone el siguiente esquema de hitos temporales (adaptado de Tardío & Mickovski, 2023):

FASE 1: Momento 0. Momento justo después de la finalización de las obras. Se comprueban las estructuras de la obra de bioingeniería sin incluir ningún efecto de la vegetación.

FASE 2: En la que se define el marco temporal mínimo dentro del cual se ha de asegurar la estabilidad del sistema a partir de las estructuras comprobadas en la FASE 1. Las comprobaciones de esta fase sirven para asegurar el buen desarrollo de la vegetación y, por tanto, dar viabilidad al progresivo trasvase de las funciones estabilizadoras entre la estructura y la vegetación.

La variación de las secciones de los elementos de madera se realizará según el método de Leicester et al. (2003) y Tardío & Mickovski (2016 y 2023). El hito temporal a comprobar en esta fase se encontrará dentro de los siguientes 15-25 años desde el momento de finalización de las obras. Para el tipo de vegetación utilizada en la provincia de Bizkaia, el tipo de material vivo empleado (estacas vivas, ramas vivas, plantaciones arbóreas y arbustivas) y la tasa de crecimiento de las especies vegetales, se propone un hito temporal mínimo de cálculo de 15 años. Este hito temporal se basa en la experiencia acumulada en obras y trabajos de bioingeniería (Zaimes et al., 2019; Bischetti et al., 2021).

FASE 3: Corresponde al momento en el que la vegetación es el elemento principal de refuerzo y estabilización en la zona de intervención. En esta fase se realiza una comprobación de la estabilidad global del conjunto en el mismo hito temporal que la FASE 2 (como mínimo, a los 15 años de vida de servicio de la obra).

Para el tipo de vegetación utilizada en la provincia de Bizkaia, el tipo de material vivo empleado y la tasa de crecimiento de las especies vegetales, se propone un hito temporal mínimo de cálculo de 15 años

Imagen 31. Metodología Tardío & Mickovski. Metodología de diseño de las obras de bioingeniería incluyendo procesos de deterioro de los materiales y efectos de refuerzo de la vegetación. En el ejemplo de la imagen se ha definido un hito temporal en t = 15 años (como valor mínimo). Se ha de asegurar, en las FASES 2 y 3, la estabilidad del sistema durante un periodo mínimo de 15 años



Una metodología realista de diseño y cálculo de una obra de bioingeniería debe ser capaz de incluir los procesos de cambio de los materiales utilizados (vivos e inertes) a lo largo de su vida de servicio

Se asegura la estabilidad y la colaboración de los elementos del sistema durante un intervalo de tiempo suficiente para que la vegetación pueda desarrollarse y evolucionar

En la imagen de la página anterior se muestra tanto la estructura temporal como las comprobaciones a realizar en cada fase de acuerdo con la metodología Tardío & Mickovski (imagen 31).

- Con las anteriores comprobaciones e hitos temporales mínimos se asegura:
- En la FASE 2, se asegura un adecuado comportamiento mecánico durante, como mínimo, los primeros 15 años por lo que la resistencia mecánica última de las estructuras de bioingeniería se alcanzará siempre en un intervalo de tiempo entre los 15 y los 50 años de vida de servicio de la obra (dependiendo de la especie de madera utilizada y las condiciones de la zona de intervención). A partir del modelo de Leicester et al. (2003) se puede calcular este hito temporal en el que se alcanza la resistencia última de la estructura.
 - En la FASE 3, se realiza la comprobación de estabilidad global en el mismo hito temporal que en la FASE 2. De esta manera se asegura un solape de tiempo en el que existe colaboración entre la estructura de madera (todavía estable en la FASE 2) y el efecto de refuerzo de la vegetación (aun cuando este solape de efectos no se tenga en cuenta para que el diseño caiga en el lado de la seguridad).

Por tanto, con el anterior enfoque se asegura la estabilidad y la colaboración de los elementos del sistema durante un intervalo de tiempo suficiente para que la vegetación pueda desarrollarse y evolucionar. Es decir, con el anterior esquema de FASES, hitos temporales y comprobaciones de seguridad, se asegura el cumplimiento del objetivo principal de la obra de bioingeniería: en el largo plazo, el principal elemento estabilizador y de refuerzo es la vegetación ya consolidada.

Por supuesto que, al anterior objetivo puramente mecánico, hay que añadir todos los beneficios ecológicos y ecosistémicos obtenidos en paralelo. De hecho, una valoración global y justa de las soluciones basadas en la naturaleza

Tabla 1. Fases de la vida de servicio de una obra de bioingeniería y parámetros a tener en cuenta en cada una de ellas a la hora de realizar las comprobaciones de estabilidad de acuerdo a la metodología Tardío & Mickovski

Fase de la vida de servicio de la obra de bioingeniería	Información necesaria para evaluar la estabilidad del sistema
FASE 1	- Propiedades mecánicas originales de los materiales inertes (naturales y manufacturados).
FASE 2	- Estimación de las pérdidas de resistencia mecánica de los materiales inertes utilizados. - Estimación de las pérdidas de sección mecánica de los elementos de madera de las estructuras de bioingeniería. - Los elementos de madera han de asegurar un periodo mínimo de 15 años de estabilidad estructural para el desarrollo de la vegetación.
FASE 3	- Estimación del crecimiento radical de la vegetación. - Estimación de las nuevas propiedades resistentes del terreno (estimación del valor de la cohesión adicional debida a la vegetación). Comprobación de la estabilidad global del sistema incluyendo el refuerzo de las raíces.



Imagen 32. Análisis, mediante resistógrafo, del estado de deterioro de los troncos utilizados en un entramado de madera en el río Artia (Irún, Guipúzcoa). Fuente: G. Tardío.

(SbN) y las técnicas de bioingeniería ha de incluir todas las tipologías de los beneficios y los efectos conseguidos a lo largo de la vida de servicio de la intervención.

La información necesaria para evaluar la estabilidad del sistema en cada una de las anteriores fases se indica en la Tabla 1:

Se ha de conseguir que los materiales inertes (vegetales y manufacturados) mantengan el sistema estable hasta la FASE 3. La profundidad del aparato radical (dato necesario para la estimación del refuerzo debido a la vegetación) se podrá estimar a partir de trabajos de campo (Böhm, 1979), de los modelos teóricos de distribución de raíces (Laio et al., 2006; Preti et al., 2010; Tardío et al., 2019; Preti et al., 2022) o a partir de la alometría y parámetros sintéticos de las distintas especies (Cornelini et al., 2008). La obtención de los valores de refuerzo de la vegetación se desarrolla en otros capítulos de la presente guía.

Las comprobaciones de estabilidad interna se pueden realizar según Menegazzi & Palmeri (2013). Las comprobaciones de estabilidad externa y global se pueden realizar siguiendo las pautas de Gray & Sotir (1996) o Tardío & Mickovski (2016). Los coeficientes de mayoración de fuerzas y minoración de las propiedades resistentes se realizarán de acuerdo a las distintas normativas existentes (por ejemplo, Eurocódigo 5).

A este esquema de diseño hay que añadir unas labores de mantenimiento y seguimiento que acompañen y recopilen información a lo largo de la vida de servicio de la obra (Tardío et al., 2019). La información recogida (imagen 32), no solo servirá para calibrar o corregir algunos aspectos que sean detectados sino también permitirá mejores diseños en las futuras obras (permitirá procesos de mejora permanente y una gestión adaptativa de la información). Ejemplos de protocolos de seguimiento de obras se pueden encontrar y descargar en <http://ecomedbio.eu/protocols> (Zaimes et al., 2019).

A este esquema de diseño hay que añadir unas labores de mantenimiento y seguimiento que acompañen y recopilen información a lo largo de la vida de servicio de la obra

Una correcta elección del material vegetal vivo a utilizar en el ámbito de las obras de bioingeniería constituye la premisa fundamental para el éxito de las intervenciones

4.3 MATERIALES Y CARACTERÍSTICAS

Como hemos visto anteriormente, lo que caracteriza la Bioingeniería del Paisaje es la utilización de plantas o partes de ellas como material de construcción vivo.

En la fase inicial es a menudo necesaria una combinación con otros materiales que inicialmente se hacen cargo de las funciones de sostén o de estabilización hasta que la planta se desarrolla. Los sistemas resultantes y sus componentes tienen ventajas y limitaciones que necesitan ser consideradas antes de seleccionarlos para su uso.

De acuerdo con la NTJ 12-5 (Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo) los materiales en bioingeniería se clasifican en cuatro grupos:

- Materiales vegetales vivos.
- Materiales vegetales muertos.
- Materiales naturales inertes.
- Materiales artificiales manufacturados.

El resultado de las obras de bioingeniería son sistemas vivos, basados en la sucesión natural, es decir, que permanecen en equilibrio mediante una autorregulación dinámica sin necesidad de aporte de energía artificial. Eligiendo bien las técnicas, así como los materiales vivos e inertes, se obtiene una extraordinaria durabilidad con bajas necesidades de mantenimiento.

4.3.1 Materiales vegetales vivos y propiedades biotécnicas

Constituyen los componentes característicos y distintivos de las técnicas de Bioingeniería. Este grupo de materiales está formado por plantas leñosas y herbáceas o partes de ellas con buenas características biotécnicas.

Una correcta elección del material vegetal vivo a utilizar en el ámbito de las obras de bioingeniería constituye la premisa fundamental para el éxito de las intervenciones.

En este contexto, se indican los siguientes criterios básicos:

- El material vegetal se elegirá después de una evaluación específica del ambiente en el cual se opera, identificando y prefigurando, siempre que sea posible, las características vegetales de las diferentes sucesiones ecológicas que puedan ser interesantes para el área de intervención.
- La elección, además, deberá estar dirigida a la protección de las especies más idóneas no sólo desde el punto de vista ecológico, sino también funcional, sobre todo donde se trata de intervenciones de reorganización y reequilibrio hidrogeológico.
- Debe subrayarse que la elección del material vegetal deberá privilegiar, en el ámbito de las especies consideradas, las que sean autóctonas de la zona; es decir, aquellas que ofrezcan la máxima adaptabilidad ecológica a las características edáficas y climáticas de la zona.

El conjunto vegetal, en lo posible, deberá ser suficientemente diversificado entre especies arbóreas y arbustivas de diferente especie y tamaño, a fin de constituir unas poblaciones de suficiente variabilidad y estructura.

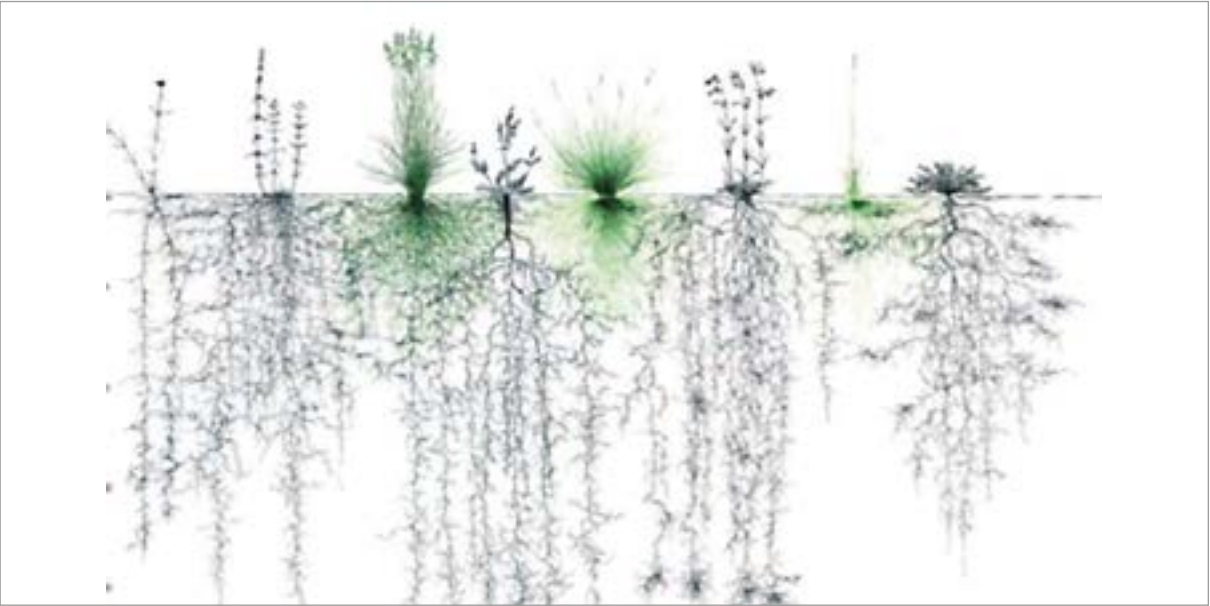


Imagen 33. Disposición de gramíneas y leguminosas con efecto consolidante del suelo. Fuente: Bautipenbuch EFIB

Según los caracteres morfológicos y dimensionales, se clasifican en los grupos siguientes:

- Fragmentos de planta no enraizados con capacidad de reproducción vegetativa.
- Plantas jóvenes y estacas enraizadas.
- Semillas.
- Tepes y herbazales.
- Rizomas.

Dentro de estos grupos, en bioingeniería cabe distinguir las especies leñosas, arbustivas y arbóreas, de las especies herbáceas.

Especies herbáceas

La vegetación herbácea ofrece una protección duradera contra la erosión superficial (lluvia y viento), y es casi siempre usada juntamente con las técnicas de estabilización y con otras técnicas de recubrimiento en bioingeniería. Estas ayudan a prevenir dicha erosión mediante:

- La retención de las partículas del suelo.
- La reducción del desplazamiento de los sedimentos.
- La interceptación de las gotas de lluvia.
- El retardo de la velocidad de dispersión del agua.
- El aumento y mantenimiento de la capacidad de infiltración.

Dentro de las especies herbáceas se emplea una mezcla de especies gramíneas, con función de sujeción, y de especies leguminosas, capaces de fijar el nitrógeno y enriquecer por tanto el suelo (imagen 33).

Especies leñosas

La vegetación leñosa, en comparación con la vegetación herbácea, enraíza generalmente más profundamente y puede estabilizar de 2 m a 2,5 m de profun-

La vegetación herbácea ofrece una protección duradera contra la erosión superficial (lluvia y viento), y es casi siempre usada juntamente con las técnicas de estabilización y con otras técnicas de recubrimiento en bioingeniería



Imagen 34. Estacas, varas y ramas. Fuente: P. Sangalli. Manual Técnico de Bioingeniería Fluvial en ámbito cantábrico

Los fragmentos de especies leñosas, con capacidad de multiplicación vegetativa y con determinadas características biotécnicas, son la parte más importante de los materiales de construcción vivos para las técnicas de estabilización

didad; así pues, proporciona una protección mayor contra los deslizamientos de tierra mediante:

- El refuerzo mecánico del suelo con el ramaje enterrado y el sistema radical más profundo.
- El drenaje de las aguas superficiales por medio de la transpiración y de la interceptación.

Dentro de las especies leñosas se distinguen: fragmentos no enraizados de especies leñosas y plantas enteras enraizadas.

A- Fragmentos no enraizados de especies leñosas

Los fragmentos de especies leñosas, con capacidad de multiplicación vegetativa y con determinadas características biotécnicas, son la parte más importante de los materiales de construcción vivos para las técnicas de estabilización.

La época idónea para la preparación del material, como norma general, es el periodo de parada vegetativa, de noviembre a febrero, y se recolectan de la vegetación existente en las proximidades.

En función de su morfología y tamaño distinguimos:

- Estacas: brotes no ramificados y leñosos, de 2 cm a 7 cm de diámetro y de 50 cm a 150 cm de longitud. En función de la parte de la planta de la que procedan, pueden ser: estacas apicales, estacas radicales, estacas de rizomas, estacas de fragmento de caña y estacas de yema.
- Ramas: son brotes ramificados y flexibles, con una longitud mínima de 60 cm y de diferente espesor.
- Varas: brotes rectos, poco ramificados, con una longitud de 150 cm a 300 cm, de 3 cm a 10 cm de diámetro.

La vegetación leñosa, en comparación con la vegetación herbácea, enraíza más profundamente y proporciona una protección mayor contra los deslizamientos de tierra mediante:

- El refuerzo mecánico del suelo con el sistema radical.
- El drenaje de las aguas superficiales por medio de la transpiración y la interceptación.
- El refuerzo mecánico del suelo producido por el ramaje enterrado.

Las especies de las familias de las salicáceas y tamaricáceas, entre otras, han sido seleccionadas y evaluadas en las obras de bioingeniería.

B- Plantas enteras enraizadas

Se emplearán cuando las obras de bioingeniería se ejecuten fuera del periodo de reposo vegetativo y en terrenos de difícil revegetación o como complemento para favorecer la diversidad y la sucesión vegetal. El material vegetal procede de viveros especializados, y es necesario contemplar un adecuado periodo de cultivo para su suministro correcto.

El suministro puede ser de planta joven (1-2 savias) a raíz desnuda o planta en envase (3 o más savias), priorizándose la utilización de planta autóctona forestal, que ofrece un buen enraizamiento y por tanto un menor índice de marras.

Las especies leñosas en envase deberán haber sido cultivadas en éste el tiempo suficiente para que las nuevas raíces se desarrollen de tal manera que, en el suministro, el cepellón mantenga su forma, esté suficientemente cohesionado y se aguante de manera compacta cuando se extraiga. Los tipos de envases utilizables son el contenedor, la maceta y la bandeja alveolar

4.3.1.1 Propiedades biotécnicas de los materiales vivos

La Bioingeniería del Paisaje aprovecha determinadas características de los materiales vegetales, propiedades biotécnicas, que pueden dividirse en dos categorías: biológicas y técnicas (Cornelini et al. 2005, 2008, 2015).

Propiedades biológicas

- Capacidad de propagación vegetativa por estacas o esquejes.
- Capacidad de emitir raíces adventicias en el tallo.
- Capacidad de tolerar la inmersión de las raíces durante varios días.
- Capacidad para tolerar suelos arenosos.
- Capacidad de soportar vientos fuertes.

La disponibilidad local de especies con estas propiedades biológicas en cantidades suficientes puede ser muy útil para optimizar los costes de construcción y, sobre todo, para utilizar plantas que seguramente ya están adaptadas al lugar en el que se va a trabajar (tabla 2).

Tabla 2. Propiedades biológicas de las especies más utilizadas en Bizkaia

Especie	Tipología	Reproducción vegetativa	Emisión raíces adventicias	Desarrollo fina en estructura (altura en m)
Salix atrocinerea	Arbusto	Sí-Fácil	Fácil	5 m - 6 m
Salix caprea	Arbusto	Sí-Fácil	Medio	5 m - 6 m
Salix eleagnos	Arbusto	Sí-Fácil	Fácil	5 m - 6 m
Tamarix sp.	Arbusto	Sí-Fácil	Fácil	5 m - 6 m
Corylus avellana	Arbusto	Sí-Medio	Medio	4 m
Euonymus europaeus	Arbusto	Sí-Medio	Medio	2 m
Sambucus nigra	Arbusto	Sí-Fácil	Fácil	4 m
Betula pendula	Árbol	Sí-Medio	Medio	15 m
Fraxinus excelsior	Árbol	Sí-Medio	Medio	12 m

La disponibilidad local de especies con estas propiedades biológicas en cantidades suficientes puede ser muy útil para optimizar los costes de construcción y, sobre todo, para utilizar plantas que seguramente ya están adaptadas al lugar en el que se va a trabajar

Propiedades técnicas

- Mejora de las características geotécnicas del suelo (ángulo de rozamiento interno, cohesión).
- Reducción del contenido de agua del suelo, gracias a los procesos de evapotranspiración de las plantas.
- Protección contra la erosión superficial del suelo por la lluvia, gracias a las partes epigeas de las plantas.
- Resistencia a la tracción y al arranque.
- Tolerancia y absorción de contaminantes en el agua, el suelo y el aire: plantas con capacidad para tolerar y absorber contaminantes.
- Protección contra el ruido y el viento en las excavaciones.

La cubierta vegetal desempeña un papel clave en la protección del suelo, gracias a sus efectos anti erosivos (mecánicos) y reguladores del agua (hidrológicos), que reducen la erosión y el transporte de sólidos aguas abajo.

Indicadores para evaluar las propiedades biotécnicas

Se pueden utilizar determinados indicadores para evaluar las propiedades biotécnicas de diferentes especies (Cornelini et al., 2015).

A- Relación entre el volumen de la raíz y el volumen del tallo (alometría)

A mayor relación, mayor idoneidad a priori para las estructuras (tabla 3).

Tabla 3. Relación entre el volumen de la raíz y el volumen tallos/troncos. Fuente: Schiechtl (1973), Florineth (1993), Adam et al. (2008), Sauli et al. (2003b, 2005)

Árboles y arbustos	
Salix glabra	2,4
Viburnum Lantana	2,3
Erica carnea	2,0
Salix eleagnos	1,8
Salix nigricans	1,8
Alnus viridis	1,6
Salix purpurea	1,5
Fraxinus excelsior	1,5
Ligustrum vulgare	1,2
Acer pseudoplatanus	1,1
Hippophae rhamnoides	1,0
Berberis vulgaris	0,6
Salix alba	0,5
Populus nigra	0,4
Salix triandra	0,4
Especies herbáceas	
Stipa species	5-15
Equisteum arvense	5,5
Rumes scutatus	5,5
Deschampista caespitosa	1,6
Festuca ovina	1,1
Anthyllis vulneraria	0,8
Achillea millefolium	0,7

La cubierta vegetal desempeña un papel clave en la protección del suelo, gracias a sus efectos anti erosivos (mecánicos) y reguladores del agua (hidrológicos), que reducen la erosión y el transporte de sólidos aguas abajo

B- Resistencia al arranque o extirpación de la planta entera (tabla 4)

Fuerza de tracción es la fuerza en N a la que se somete a la planta hasta su entera extirpación.

Tensión de tracción es la fuerza que se opone a la fuerza que tiende a extirpar la planta entera.

C- Resistencia a la tracción de las raíces (tabla 5)

Este aspecto se evalúa mediante ensayos convencionales de resistencia de materiales.

Resistencia a la Tracción de las raíces: es la resistencia que ofrece como media la raíz de una planta a ser extirpada.

Fuerza de tracción es la fuerza en N a la que se somete a la planta hasta su entera extirpación

Tabla 4. Resistencia a la extirpación de plantas enteras. Fuente: F. Florineth (1993)

Especie	Fuerza de tracción	Diámetro raíz	Tensión de tracción
Poa annua	1,04		
Agrostis stolonifera	1,24		
Festuca duriuscula	2,04		
Deschampsia caespitosa	2,90		
Lolium perenne	5,00		
Nardus striata	7,60		
Bromus inernis	9,09		
Trifolium repens	3,50	0,90	547
Anthyllis vulneraria	86,00	3,50	901
Trifolium hybridum	125,00	3,10	1658
Lotus corniculatus	142,00	3,60	1404
Trifolium pratense	154,00	3,70	1438
Onobrychis sativa	350,00	10,00	443
Medicago sativa	3250,00	30,00	460
Salix caprea	5500,00	85,00	97
Betula pendula	3000,00	53,00	136
Carpinus betulus	4000,00	78,00	83

Tabla 5. Valores de resistencia a la tracción de las raíces. Fuente: Sauli et al. (2003b) y Greenway D. R., (1987)

Especie	Resistencia de las raíces a la tracción (Mpa valores medios)
Spartium junceum	1,04
Salix purpurea	1,24
Euonymus europaeus	2,04
Rhamnus alaternus	2,90
Quercus robur	5,00
Cytisus scoparius	7,60
Acer campestre	9,09
Viburnum tinus	3,50
Phillyrea latifolia	86,00
Coronilla emerus	125,00
Pistacia terebinthus	142,00
Salix elaeagnos	154,00
Populus nigra	350,00

Tabla 6. Propiedades biotécnicas de las especies más utilizadas en Bizkaia

Especie	Resistencia media a tracción (MPa)	Resistencia al arranque (Pull out strength) (kN)	Tipo de sistema radical	Alometría (vol. aparato radical/vol. parte aérea)
<i>Salix atrocinerea</i>	25	14	Extensivo. Profundidad media	1,7
<i>Salix caprea</i>	48	5,5	Extensivo. Profundidad media	1,9
<i>Salix eleagnos</i>	15	18	Extensivo. Profundidad media	1,8
<i>Tamarix sp.</i>	50	12	Profundo	1,5
<i>Coryllus avellana</i>	70		Extensivo	0,7
<i>Euonymus europaeus</i>	35		Extensivo	0,7
<i>Sambucus nigra</i>	34,6		Más bien superficial	0,7
<i>Betula pendula</i>	37	3	Más bien superficial	0,5
<i>Fraxinus excelsior</i>	40	38	Extensivo y profundo	1,5

Estos valores se obtienen generalmente mediante ensayos de laboratorio como los que se describen a continuación:

Ensayos del material vegetal: se recomienda la realización de ensayos de caracterización del sistema radical, así como la medición de la biomasa aérea de la planta. Se recomienda realizar ensayos a cortante (in situ y/o en laboratorio) de muestras de suelo con y sin raíces. En caso de realizarse una cata o trinchera para el estudio del sistema radical, se tomarán muestras de raíces para la realización de ensayos a tracción de éstas (De Baets et al., 2008). Para la caracterización de la distribución del sistema radical con la profundidad, se seguirán las recomendaciones de Böhm (1979).

4.3.2 Materiales vegetales muertos

Los materiales vegetales muertos que se utilizan en las técnicas de bioingeniería son materiales de origen orgánico como maderas, geoproductos orgánicos de fibras naturales, que actúan como elementos estructurantes del suelo, y estructuras de geo-productos revegetados. Todos son productos, por tanto, de origen orgánico; así pues, se descomponen con el tiempo y los residuos producidos en la obra deberán ser reincorporados a la misma para aprovechar su capacidad de mejorar la fertilidad del suelo.

Maderas

La madera es un componente de las técnicas mixtas que, en ocasiones, se usa de forma combinada con piedras y áridos. Su función es temporal para la consolidación de las estructuras hasta que las plantas vivas se hagan cargo de la función estructural.

Se emplean troncos de madera de diámetros variables, ramas e incluso árboles enteros y tocones de especies tales como el pino y el alerce, entre otras. Para aumentar su durabilidad se recomienda descortezar los troncos, especialmente en las maderas de crecimiento rápido, para evitar que se pudra la madera antes de que la planta la sustituya en su función estructural. El tamaño, longitud y diámetro varían dependiendo de las técnicas aplicadas y de la disponibilidad en la obra.

La madera es un componente de las técnicas mixtas que, en ocasiones, se usa de forma combinada con piedras y áridos



Imagen 35. Troncos de madera descortezados para estructuras como entramados y empalizadas

Geoproductos de fibras naturales

Los materiales orgánicos de fibras naturales proporcionan una protección temporal contra la erosión superficial y ayuda en el establecimiento de la vegetación. Los materiales más utilizados en las técnicas mixtas de revestimiento son de origen vegetal: coco, esparto, yute, paja, celulosa, residuos forestales, etc. A veces están compuestos por más de un componente: coco y paja, por ejemplo.

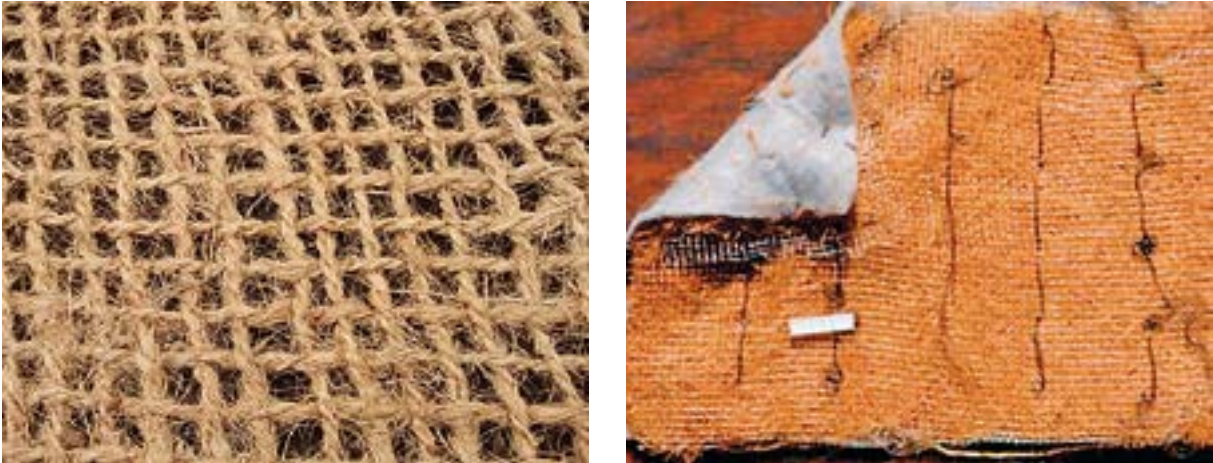
En función de cómo se ensamblen los materiales encontramos:

- **Mantas orgánicas:** las fibras están tejidas.
- **Mallas orgánicas:** Las fibras, además de tejidas, se encuentran entrelazadas formando una red.

Las mantas orgánicas y mallas de fibras naturales son productos degradables que se utilizan para el control temporal de la erosión hasta que la vegetación ha enraizado y estabilizado el terreno. En estructuras en ámbito fluvial también pueden tener la función de contener los finos y evitar el lavado de la tierra en época de crecida.

Las fibras de esparto o coco tienen una mayor longevidad y resistencia a la tracción. Dependiendo del tipo de actuación a realizar, bien sea soporte o cu-

Imagen 36. Malla y manta orgánicas. Fuente: P. Sangalli



Los materiales orgánicos de fibras naturales proporcionan una protección temporal contra la erosión superficial y ayuda en el establecimiento de la vegetación

Los materiales naturales también pueden ser obtenidos sobre el terreno en el transcurso de la obra reduciendo el coste de las actuaciones

bierta protectora de hidrosiembras y/o plantaciones, y en función de la granulometría del terreno, la pendiente, etc., se determinarán el tipo de fibra a utilizar, el tipo de gramaje (gr/m²) y el tipo de material (manta o red).

Estructuras de geoproductos revegetadas

Existen diversos productos manufacturados que junto con las fibras vegetales incorporan semillas o tierra vegetal, productos absorbentes e incluso vegetales precultivados, como en el caso de los herbazales estructurados o de las mantas vegetadas (imagen 37).

4.3.3 Materiales naturales inertes

Este grupo de materiales está formado por materiales naturales como tierra vegetal, rocas, piedras, material de excavación... Se trata de materiales terrosos y pétreos de diferentes tamaños que actúan como material de relleno, de drenaje y para la consolidación y protección de la base en las estructuras.

Estos materiales naturales (imagen 38) normalmente cuestan menos, son ecológicamente más compatibles y son más apropiados para las revegetaciones que los materiales manufacturados. Los materiales naturales también pueden ser obtenidos sobre el terreno en el transcurso de la obra reduciendo el coste de las actuaciones.

Imagen 37. Biorrollos y manta orgánica en talud y biorrollos en cárcavas. Fuente: P. Sangalli.-SCIA S.L.



Imagen 38. Piedra de escollera y tierra vegetal



Imagen 39. Elementos de fijación: grapas, clavos de acero corrugado, tornillos



Imagen 40. Elementos de refuerzo: mallas de triple torsión, gaviones cilíndricos flexibles

Materiales de origen pétreo: Se emplean en la creación de pequeñas escolleras, relleno de gaviones o cimentación de estructuras.

Materiales terrosos: Se emplea tanto tierra vegetal como tierra procedente de la excavación.

4.3.4 Materiales artificiales manufacturados

Este grupo de materiales está formado por un conjunto diverso de materiales metálicos o sintéticos que se emplean como material de fijación (grapasp, clavos), como material de refuerzo o sujeción (redes, mallas sintéticas...).

Aunque no siempre es posible, se recomienda utilizar elementos biodegradables y naturales frente a los artificiales y manufacturados.

Elementos de fijación. Pueden ser flexibles, como el alambre, o rígidos como las barras de acero corrugado, las grapas, los clavos o los tornillos y los buzones. Los clavos para fijar las estructuras de madera pueden ser barras de acero corrugado de diámetro 10 mm - 12 mm con punta o bien tornillería metálica para madera (imagen 39).

Elementos de refuerzo. Son mallas sintéticas, geoceldas, redes metálicas de doble o triple torsión o estructuras como los gaviones (imagen 40).

Los materiales artificiales manufacturados son un conjunto diverso de materiales metálicos o sintéticos que se emplean como material de fijación (grapasp, clavos), como material de refuerzo o sujeción (redes, mallas sintéticas...)



5. POTENCIALES APLICACIONES DE LAS TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE EN INFRAESTRUCTURAS LINEALES



Las técnicas de bioingeniería del paisaje tienen múltiples aplicaciones en la construcción y mantenimiento de las infraestructuras lineales

Las técnicas de Bioingeniería del Paisaje tienen múltiples aplicaciones en la construcción y mantenimiento de las infraestructuras lineales. Las principales actuaciones son:

- Control de la erosión superficial y estabilización de terraplenes con siembra, siembras hídras, mantas orgánicas, estaquillados, plantación de arbustos y árboles, etc.
- Estabilización de los taludes.
- Estabilización de deslizamientos.
- Integración paisajística de las obras.
- Drenaje de las obras: cunetas y bajantes.
- Balsas depurativas.
- Consolidación y estabilización de emboquillados de túneles.
- Barreras verdes anti-ruido, antideslumbrantes, etc.
- Revegetación de taludes bajo viaductos.
- Medidas de continuidad de la fauna (pasos elevados y subterráneos, barreras y redes de desvío para la fauna menor, etc.).
- Restauraciones de los cursos de agua en las interferencias con regatas.
- Contención de rellenos.

En la infografía bajo estas líneas se muestran ejemplos de aplicación de la bioingeniería en infraestructuras lineales.

En este capítulo se analizarán las potenciales aplicaciones de las técnicas de bioingeniería en los proyectos de infraestructuras lineales. Así mismo, se muestra una comparativa entre dos modelos de intervención para ejecutar una obra: por una parte, tendríamos la construcción convencional, y por otro, las técnicas de bioingeniería, donde prima la contribución de la naturaleza para realizar funciones de estabilización depuración, integración, mejora de condiciones ambientales y como precursor de hábitats naturalizados. Se establece una comparativa entre ambas técnicas, y se ilustran estas actuaciones a través de ejemplos o casos

Imagen 41. Ejemplos de potenciales actuaciones de bioingeniería en infraestructuras lineales. Fuente: REG



llevados a cabo en la Comunidad Autónoma del País Vasco, cuyos condicionantes se asumen muy similares a los del Territorio Histórico de Bizkaia.

El análisis contempla ventajas y desventajas de cada sistema para plantear posibles reflexiones sobre el modo en que debemos intervenir en el medio. Hay que tener en cuenta que no en todas las ocasiones puede aplicarse la bioingeniería de forma genérica y se requieren estudios más detallados.

En ese equilibrio entre mantenimiento y eficiencia debemos incluir también la naturalización de nuestras obras como elemento que nos ayude a reducir la huella de carbono en nuestro territorio.

No en todas las ocasiones puede aplicarse la bioingeniería de forma genérica

CONTROL DE LA EROSIÓN SUPERFICIAL

CONSTRUCCIÓN CONVENCIONAL		CONSTRUCCIÓN BIOINGENIERÍA
DESCRIPCIÓN		
Talud hidrosemebrado.		Cubrición de taludes con mantas biodegradables antierosivas que contribuyen a la germinación de semillas. Estas técnicas se complementan con reperfilados, bermas y estaquillados.
Rápida aplicación. Técnica con muchas experiencias y procedimientos muy extendidos.		Control erosión. Buena integración paisajística. Almacenamiento adicional de agua para la germinación de semillas.
Generación de regueros erosivos con climatología adversa. Desarrollos muy desiguales de la cobertura vegetal.		Mayor coste.
La restauración de regueros erosivos es una labor muy costosa. Conllevan reperfilados y aplicación de fajinas conformando drenajes e hidrosiembras con aporte de sustratos.		Las mantas biodegradables además de contribuir a evitar la erosión del talud favorecen el arraigo de las semillas.

ESTABILIZACIÓN DE DESPRENDIMIENTOS Y DESLIZAMIENTOS DE LADERA

CONSTRUCCIÓN CONVENCIONAL



CONSTRUCCIÓN BIOINGENIERÍA



Muro de contención tipo escollera convencional con cimiento de hormigón.

Entramado de troncos en muro Krainer simple y empalizadas de troncos con drenajes de piedras.

VENTAJAS

Bajo mantenimiento.
Alta resistencia e impermeabilidad.
Técnica con muchas experiencias y procedimientos muy extendidos.

Buena integración paisajística.
Contribuye a generar hábitats
Reducción presión hídrica por actuación de secado por el sistema radicular de las plantas estaquilladas.
Huella de carbono neutra.
Construcción rápida.
Incremento de resistencia con el paso del tiempo.

DESVENTAJAS

Baja integración paisajística.
Alta huella de carbono.

Requiere un cierto mantenimiento (Poda e inspecciones)

OBSERVACIONES

Las estructuras de hormigón o las escolleras convencionales no evolucionan, se van deteriorando con el paso del tiempo.

La estabilidad aumenta con el tiempo con el arraigo de la vegetación.


INTEGRACIÓN PAISAJÍSTICA

CONSTRUCCIÓN CONVENCIONAL



CONSTRUCCIÓN BIOINGENIERÍA



Talud gunitado con hormigón proyectado y bulonado.

Sostenimientos realizados mediante estructuras de madera, empalizadas vivas. Todas las estructuras se estaquilan y/o se plantan. Las estructuras buscan minimizar el impacto visual generando islas verdes.

VENTAJAS

No requiere mantenimiento.

Buena integración paisajística.
La vegetación genera cobijo y resguardo a la fauna.
Los arbustos que se plantan absorben polvo y reducen los infrarrojos reflejados.

DESVENTAJAS

Su integración paisajística es muy baja.

Requiere un mantenimiento de jardinería .
Necesita espacio para su instalación.

OBSERVACIONES

Estos taludes gunitados normalmente son integrados mediante enredaderas o empleando pinturas envejecedoras que potencian tonos ocres de óxidos.

Las estructuras evolucionan, la vegetación crece y se van renovando las plantas.

69

CONSTRUCCIÓN DE ALETAS Y BAJANTES

CONSTRUCCIÓN CONVENCIONAL



CONSTRUCCIÓN BIOINGENIERÍA



DESCRIPCIÓN

Obra de muros de hormigón, encofrados y con armadura metálica. Suelo de losa armada de hormigón.

Entramado de troncos en muro Krainer simple y bajante escalonado con empalizadas de troncos con piedras encachadas.

VENTAJAS

Bajo mantenimiento.
Alta resistencia e impermeabilidad.
Técnica con muchas experiencias y procedimientos muy extendidos.

Buena integración paisajística.
Contribuye a generar hábitats
Laminación de flujos de agua y filtración de sólidos.
Huella de carbono neutra.
Construcción rápida.
Incremento de resistencia con el paso del tiempo.

DESVENTAJAS

Mala integración paisajística.
Baja laminación del agua.
Alta huella de carbono.

Requiere un cierto mantenimiento (Poda e inspecciones)

OBSERVACIONES



Las estructuras de hormigón no evolucionan, se van deteriorando con el paso del tiempo.

Las estructuras evolucionan, la vegetación crece y se van renovando las plantas. La estabilidad aumenta con el tiempo.



CONSTRUCCIÓN DE BAJANTES ESCALONADAS

CONSTRUCCIÓN CONVENCIONAL



CONSTRUCCIÓN BIOINGENIERÍA



DESCRIPCIÓN

Bajantes escalonadas de hormigón prefabricadas tipo B-2

Sostenimientos realizados mediante estructuras de madera, empalizadas vivas. Todas las estructuras se estaquillan y/o se plantan.

VENTAJAS

Bajo mantenimiento.
Son estructuras impermeables

Buena integración paisajística.
Estas bajantes tienen efecto de laminación del agua.
Los arbustos que se plantan absorben polvo y reducen y contribuyen a depurar el agua por aumento de microorganismos en el suelo.

DESVENTAJAS

Su integración paisajística es muy baja.
Con el paso del tiempo los bloques tienden a desplazarse debido a asentamientos diferenciales en los escalones

Requiere un mantenimiento de jardinería. Necesita espacio para su instalación. Su impermeabilización es compleja.

OBSERVACIONES

Estos taludes gunitados normalmente son integrados mediante enredaderas o empleando pinturas envejecedoras que potencian tonos ocres de óxidos.

Las estructuras evolucionan, la vegetación crece y se van renovando las plantas.

CONSTRUCCIÓN DE BALSA DEPURATIVA

CONSTRUCCIÓN CONVENCIONAL



CONSTRUCCIÓN BIOINGENIERÍA



DESCRIPCIÓN

Instalación de arquetas de retención de sólidos e hidrocarburos. Arquetas hidrociclónicas construidas en hormigones especiales y resinas.

Balsa con geometría multicharca, revegetada con lechos impermeables y con cobertura de piedras. Obra de entrada realizada mediante bajante escalonado con empalizadas de troncos con piedras encachadas.

VENTAJAS

Ocupa muy poco espacio
Alta resistencia e impermeabilidad.

Buena integración paisajística.
Contribuye a generar hábitats para anfibios
Laminación de flujos de agua y filtración de sólidos.
Biodegradación de hidrocarburos.

DESVENTAJAS

Succión periódica de residuos acumulados.
Son trampas para pequeños animales.

Requiere un cierto mantenimiento.
Necesita espacio para su instalación.

OBSERVACIONES

Las estructuras de hormigón no evolucionan, se van deteriorando con el paso del tiempo.

Las estructuras evolucionan, la vegetación crece y se van renovando las plantas.
Estas balsas laminan, depuran y generan hábitats para especies amenazadas como son los anfibios y suponen reservas de agua en momentos de estiaje.

CONSTRUCCIÓN DE PANTALLAS ANTIRRUIDO

CONSTRUCCIÓN CONVENCIONAL



CONSTRUCCIÓN BIOINGENIERÍA



DESCRIPCIÓN

Pantallas construidas con diferentes materiales: madera, policarbonatos y vigas de acero sobre losas o zapatas de cimentación.

Caballones de tierra estabilizados mediante estructuras de madera tipo Krainer doble o empalizadas vivas. Toda la estructura se estaquilla o se planta.

VENTAJAS

Ocupa muy poco espacio.

Buena integración paisajística.
Regula la temperatura por sombrero y generación de humedad ambiental.
La vegetación absorbe polvo en suspensión y contribuye a reducir el impacto sonoro.
Se emplean tierras sobrantes de excavación reduciendo los vertederos de sobrantes.

DESVENTAJAS

Requieren cimentaciones de hormigón. La madera tratada tiene una vida útil entre 10 y 15 años, después se deben sustituir. Alta huella de carbono.

Requiere un cierto mantenimiento.
Necesita espacio para su instalación.

OBSERVACIONES

Las estructuras de hormigón no evolucionan, se van deteriorando con el paso del tiempo.

Las estructuras evolucionan, la vegetación crece y se van renovando las plantas.
Este tipo de pantallas conforman verdaderos setos vegetados.
La tierra es un material ampliamente utilizado como elemento de insonorización ya que absorbe y no refleja el sonido.

CONSTRUCCIÓN DE PASOS DE FAUNA

CONSTRUCCIÓN CONVENCIONAL



CONSTRUCCIÓN BIOINGENIERÍA



DESCRIPCIÓN

Construcción de bancos secos con piedra de escollera y hormigón.

Sostenimientos realizados mediante estructuras de madera tipo Krainer simple o empalizadas vivas. Todas las estructuras se estaquillan y/o se plantan.

VENTAJAS

No requiere mantenimiento.

Buena integración paisajística.
La vegetación genera cobijo y resguardo a la fauna.
Se naturaliza la actuación sobre el cauce.

DESVENTAJAS

Su integración paisajística es muy baja.
El entorno al paso de fauna no resulta atractivo o favorecedor para dirigir la fauna y evitar que los animales sean atropellados en las carreteras.

Requiere un cierto mantenimiento.
Necesita espacio para su instalación.

OBSERVACIONES



Las estructuras evolucionan, la vegetación crece y se van renovando las plantas.

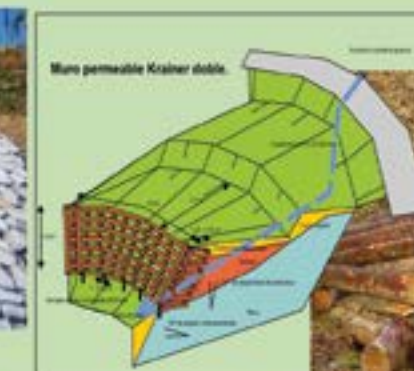


CONTENCIÓN DE RELLENOS

CONSTRUCCIÓN CONVENCIONAL



CONSTRUCCIÓN BIOINGENIERÍA



DESCRIPCIÓN

Obra de contención realizada mediante escollera. Contención de tierras en rellenos y vertederos.

Entramado de troncos, muro Krainer doble con estaquillado de sauces. Función contención de tierras sobrantes. Estas técnicas se complementan con reperfilados, bermas y estaquillados.

VENTAJAS

Bajo mantenimiento.
Alta resistencia e impermeabilidad.
Técnica con muchas experiencias y procedimientos muy extendidos.

Buena integración paisajística.
Contribuye a generar hábitats
Laminación de flujos de agua y filtración de sólidos.
Huella de carbono neutra.
Construcción rápida.
Incremento de resistencia con el paso del tiempo.

DESVENTAJAS

Mala integración paisajística.
Alta huella de carbono.

Requiere un cierto mantenimiento (Poda e inspecciones)

OBSERVACIONES



Las escolleras no evolucionan, se van deteriorando con el paso del tiempo. Su integración se dificulta si los bloques se asientan en hormigón.

Las estructuras evolucionan, la vegetación crece y se van renovando las plantas. La estabilidad aumenta con el tiempo.



5.1 EJEMPLOS DE ACTUACIONES MEDIANTE EL EMPLEO DE BIOINGENIERÍA

5.1.1 CASO DE ESTUDIO 1: Estabilización de un desprendimiento ubicado en el PK 411-300 de la N-1 (Gipuzkoa) en la estructura P.2.4

DATOS CLAVE

Carretera: N-1
Localización: Idiazabal
Coordenadas UTM: X 562332,616; Y 4759606,854
Técnicas empleadas:
Entramado loricata
Enrejado vivo
Fajinas
Cuneta escalonada
Siembras y plantaciones
Ejecución: diciembre 2011. 3 semanas
Área afectada: 620 m²
Propiedad de los terrenos afectados:
Diputación Foral de Gipuzkoa
Proyecto: SCIA S.L. e Ikerlur S.L.
Promotor: Departamento de Carreteras de la Diputación Foral de Gipuzkoa

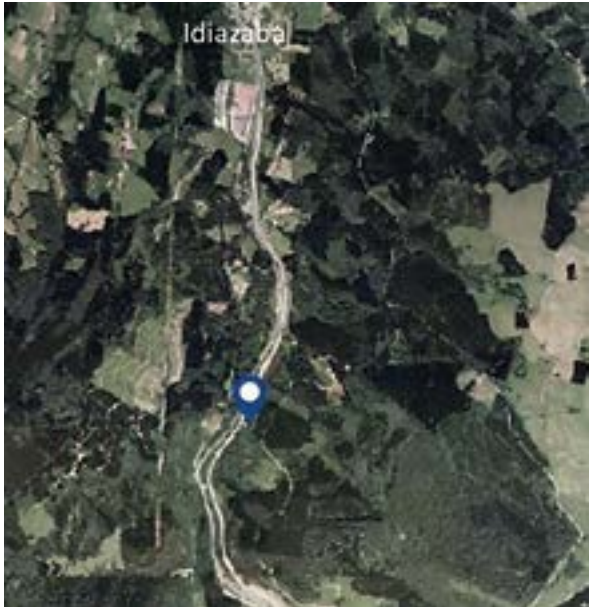


Imagen 42. Localización desprendimiento

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE INTERVENCIÓN

La actuación consiste en la estabilización de un desprendimiento en la N-1 en un punto en el que existe un muro anclado de hormigón armado construido en el año 2000 de 75 metros de longitud y de hasta seis metros de altura constituido en dos alturas.

El muro está instrumentalizado, lo que permite el seguimiento de las sobrecargas a las que se ve afectado y equilibra un deslizamiento previo de tipo rotacional en suelos de gran diámetro: la cota superior es +385 metros y el pie está a cota de la actual carretera N-1 en sentido Vitoria (+342 metros).

Imagen 43. Situación del deslizamiento y cuneta rota. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L. - IKERLUR S.L.



CARACTERIZACIÓN

Superficie de la intervención: 620 m².
Altitud sobre el nivel del mar: +342 m - +385 m.
Rango de carretera: Carretera Nacional.

Datos climáticos
Tipo de clima: templado-atlántico transición mediterráneo.
Precipitación máxima anual: 101 mm noviembre.
Precipitación mínima anual: 34 mm agosto.
Precipitación media anual: 1.070 mm.
Temperatura media mínima: 4 °C, mes enero.
Temperatura media máxima: 26 °C mes agosto.
Temperatura media anual: 14,5 °C.
Evapotranspiración potencial: de 600 mm a 700 mm.

Geología
Litología dominante: rocas dendríticas, alternancia de limonitas y argilitas más o menos calcáreas de grano medio, areniscas con granos de cuarzo y micáceas en matriz con cierta componente arcillosa.

Edafología
Tipo de suelos: suelos de naturaleza coluvial, bolos y gravas arcillosos con algo de arena de compacidad medianamente densa a densa.

Geotecnia
Ángulo de rozamiento interno del suelo (°): 30°.

Caracterización de la ladera
Pendiente: 45° - 35°.
Orientación: Oeste.

Breve caracterización hidrológica de la ladera
Calculado por el método racional.

Periodo de retorno	Caudal
t=2,33 años	0,27 l/s
t=10 años	9,30 l/s
t=100 años	32,75 l/s
t=500 años	57,83 l/s

Breve caracterización botánica de la zona de intervención

Vegetación potencial:
Robledal-bosque mixto atlántico.

Vegetación actual en las inmediaciones:
- **Estrato arbóreo:** plantaciones forestales de *Pinus radiata* y ejemplares aislados de *Fraxinus excelsior*, *Betula pendula*, *Pinus radiata*, *Chanaecyparis lawsoniana*, *Quercus rubra*, *Robinia pseudoacacia*.
- **Estrato arbustivo:** *Ulex europaeus*, *Citrus scoparius*, *Ulex europaeus* y *Rubus ulmifolius*.

Observaciones
Previamente a la propuesta con bioingeniería existía una propuesta desde la ingeniería tradicional mediante micropilotes. Se desestimó porque requería el cierre de la carretera durante un mes.
El drenaje del muro requiere solución al estar colapsado por los finos procedentes del deslizamiento.

DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

La rotura tiene lugar tras unas intensas lluvias y afecta a una superficie variable entre (13 - 20) metros de anchura y 40 metros de longitud. La diferencia de cotas entre el pie y la cabeza del deslizamiento es de unos 18 metros. La ladera tiene una pendiente media de 35° y antes del desprendimiento se encontraba completamente vegetada. El estudio de campo realizado revela que la causa que provoca el deslizamiento es el mal funcionamiento de la cuneta de coronación que se encuentra desplazada, agrietada y hundida debido a un deslizamiento anterior provocado por el mal drenaje de una pista forestal (imagen 43). Durante una de las visitas realizadas a la zona en un día de lluvia pudo constatar que por la bajante de la cuneta apenas bajaba agua.

La saturación de los materiales que constituyen la ladera natural después del periodo de lluvias implica un incremento de peso de la masa potencialmente inestable y una menor resistencia al corte.

El estudio de campo se ha completado con información adicional entre la que se encuentra la realización de una topografía de detalle (imágenes 44 y 45), la realización de sondeos in situ, el estudio hidrológico de la ladera, o el estudio de la vegetación existente y potencial.

PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

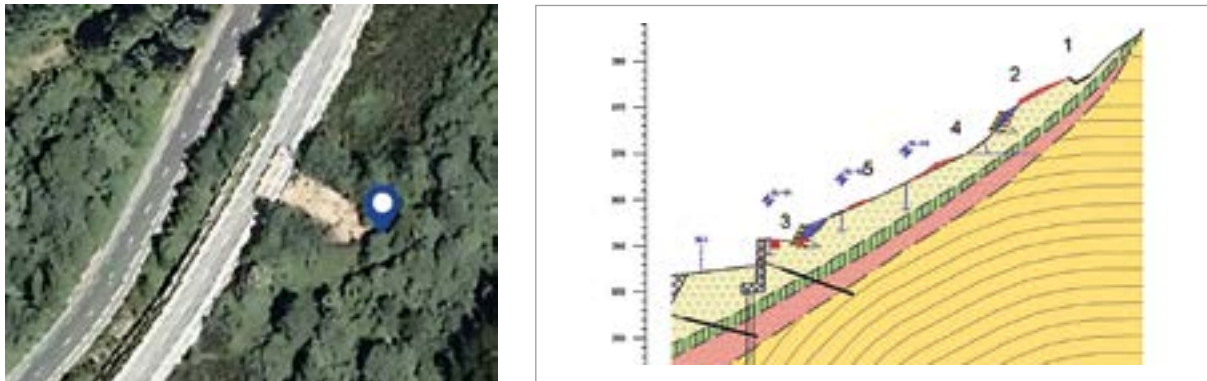


Imagen 44. Localización del desprendimiento 2011. Perfil de intervención. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L. - IKERLUR S.L.



Imagen 45. Localización del desprendimiento 2011. Perfil de intervención y planta con soluciones propuestas. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L. - IKERLUR S.L.

A continuación, se detallan las diferentes actuaciones desarrolladas e indicadas en la imagen 45. Localización del desprendimiento 2011, perfil de intervención y planta con soluciones propuestas.:

1. Recuperar la funcionalidad hidráulica de la cuneta de hormigón.
2. Reperfilado del talud. Compensación, excavación y relleno.
3. Drenaje del muro dren mediante grava y tubo poroso recubierto de geotextil.
4. Estabilización al pie del talud y donde el talud supera la pendiente de estabilidad mediante entramado loricata revegetado.
5. Construcción de enrejado vivo en el punto de mayor pendiente.
6. Drenajes superficiales mediante fajas colocadas transversalmente a la ladera y con inclinación de 30°, dirigidas hacia la zona exterior del deslizamiento donde el agua se recoge con una canaleta de madera vegetada.
7. Recubrimiento superficial mediante hidrosiembra y plantaciones de arbolado y arbustos autóctonos con objeto de incrementar la biodiversidad y mejorar la estructura de la vegetación.

TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA EJECUTADAS

Técnicas mixtas de estabilización:

Entramado loricata colocado al pie del talud y en media ladera (imagen 46).

El entramado loricata es una estructura mixta compuesta por una estructura en acero, anclada a una placa de cimentación, que sirve de soporte a troncos de madera. De este modo, se genera una cara vista en la que se insertan estacas vivas de especies autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa.

En el caso de la parte baja de la intervención de la N-1, se plantearon entramados loricata a pie de talud. En cuanto a la longitud, se construyen dos loricatas de tres metros, colocadas en la parte central y dos de cuatro metros situadas a los lados (imagen 47).



Imagen 46. Estructura loricata, loricatas superiores en ejecución y loricatas superiores terminadas. En la imagen 45 se corresponde con el número 4. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.



Imagen 47. Loricatas superiores recién terminada y loricatas superiores terminada. En la imagen 45 se corresponde con el punto 4. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.

Enrejado vivo para poder subsanar el problema de la pista abierta en la parte superior por la máquina y que había dejado pendientes entorno a los 50° (imagen 48).



Imagen 48. Enrejado y fajinas. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L. En la imagen 45 indicado por el número 5.

Técnicas de drenaje:

Canaleta viva de piedra y madera que se conecta con el drenaje existente (imágenes 49 y 50).



Imagen 49. Canaleta de piedra y madera y encaje con el desagüe existente. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.

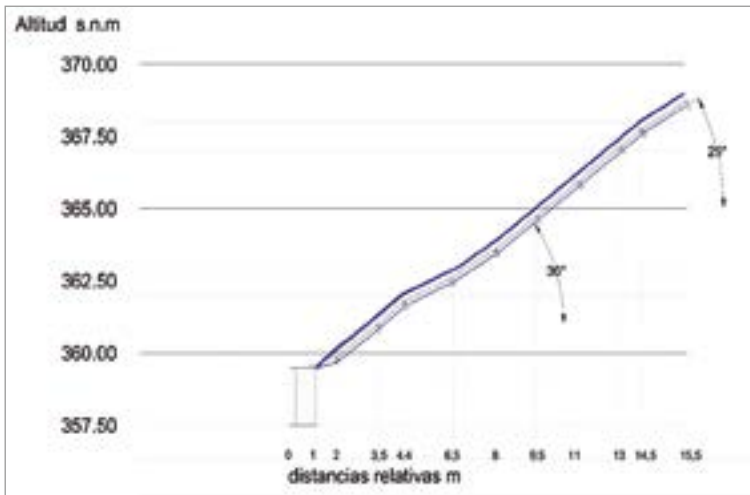


Imagen 50. Perfil que muestra la canaleta (piedra y madera) y el encaje con el desagüe existente

Las **fajinas de drenaje** se construyen sobre la superficie que queda entre las dos hileras de loricata y se incluyen en la canaleta de piedra y madera (imagen 51). Asimismo, se plantea una fajina en el trasdós de las loricata superiores.



Imagen 51. Fajinas antes de cubrir y fajinas brotadas. En la imagen 45 indicado con el número 6. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.

Técnicas de recubrimiento:

Se llevó a cabo una siembra de herbáceas gramíneas y leguminosas y una plantación de arbustos.

- **Especies arbustivas plantadas:** *Corylus avellana*, *Cornus sanguinea*, *Euonymus europaeus*.
- **Especies empleadas en las estructuras:** *Salix atrocinerea*, *Cornus sanguinea*, *Euonymus europaeus*.

COMENTARIOS A LA EJECUCIÓN

Para poder arreglar la cuneta de guarda, se abrió una pista en medio del talud que provocó un incremento de inclinación por lo que se tuvieron que replantear las soluciones inicialmente proyectadas. En la propuesta inicial el enrejado no estaba previsto y el encaje de ambas loricatas resultó algo distinto al planteado.

Los troncos que llegaron a obra tenían un gran tamaño, siendo preferible que tengan menor diámetro para facilitar su manejabilidad en obra. Todas las estaquillas utilizadas en las estructuras proceden de las inmediaciones de la obra. A pesar de que la obra se llevara a cabo en diciembre, debido a un otoño suave, los sauces llegaron todavía con hojas, pero en perfecta parada vegetativa, por lo que la brotación fue muy buena ya en los primeros dos meses de obra.

La obra se desarrolló en tres semanas, requiriendo el corte de un carril durante unas horas para la descarga de los materiales y de la loricata. El resto de la obra no hizo falta mantener el carril cortado (imagen 52).

Imagen 52. Situación durante la obra y situación en 2021. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.



5.1 EJEMPLOS DE ACTUACIONES MEDIANTE EL EMPLEO DE BIOINGENIERÍA

5.1.2 CASO DE ESTUDIO 2: Trabajos de revegetación y estabilización en los taludes situados a la altura del PK 1.650 de la GI-3920, Viaducto Basagoiti AP1-Aretxabaleta (Gipuzkoa)

DATOS CLAVE

Carretera: GI-3920
Localización: Aretxabaleta
Coordenadas UTM: X 539875,684; Y 4765143,052
Técnicas empleadas:
Hidromanta
Hidrosiembra enriquecida
Fajinas de drenaje
Estaquillado
Estaquillado en escollera
Lechos de ramaje
Escollera revegetada
Plantaciones de árboles y arbustos
Ejecución: enero-febrero 2013. 3 semanas
Área afectada: 2.000 m²
Propiedad de los terrenos afectados:
Diputación Foral de Gipuzkoa
Proyecto: SCIA S.L.
Promotor: Departamento de Carreteras de la Diputación Foral de Gipuzkoa



Imagen 53. Localización desprendimiento

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE INTERVENCIÓN

El Viaducto Basagoiti es una estructura perteneciente a la AP-1, a su paso por el municipio guipuzcoano de Aretxabaleta. Se trata de un viaducto de más de 440 m de longitud que se terminó de ejecutar en 2009. El viaducto está conformado por dos tableros. La actuación se encuentra bajo el Viaducto sobre una superficie afectada de 12.000 m².

Imagen 54. Lado sur y lado norte bajo el túnel de Basagoiti. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.



CARACTERIZACIÓN

Superficie de la intervención: 12.000 m².
Altitud sobre el nivel del mar: +280 m - +253.
Rango de carretera: Carretera Provincial y Autopista del Norte AP-1.

Datos climáticos

Tipo de clima: templado-atlántico transición mediterráneo.
Precipitación máxima anual: 121 mm noviembre.
Precipitación mínima anual: 58 mm julio.
Precipitación media anual: 1.066 mm.
Temperatura media mínima: 4,9 °C mes enero.
Temperatura media máxima: 18,4 °C mes agosto.
Temperatura media anual: 11,5 °C.
Evapotranspiración potencial: de 500 mm a 600 mm.

Geología

Litología dominante: la zona de intervención se corresponde con la sombra del viaducto de Basagoiti. En esta área, los materiales son casi en su totalidad de relleno, concretamente, limolitas procedentes de la excavación de los túneles de la propia AP-1.

Edafología

Tipo de suelos: escasez de suelo. Restos de tierra vegetal arcillosa en zonas bajas.

Geotecnia

Ángulo de rozamiento interno del suelo (°): 38°.

Caracterización de la ladera

Pendiente: 45° - 35°.
Orientación: Norte y Sur.

Breve caracterización hidrológica de la ladera

El área de intervención está marcada por varios problemas relacionados con la escorrentía superficial debido a la presencia de la infraestructura:

1. Bajo los tableros: las escorrentías superficiales que corren desde los estribos abren fácilmente cárcavas y surcos en la superficie no vegetada.
2. Los desagües del drenaje longitudinal de los tableros, que existen en ambas calzadas cada 15 metros aproximadamente, provocan un chorro de agua concentrada en esos puntos, provocando zonas de erosión.

Breve caracterización botánica de la zona de intervención

Vegetación potencial: Robledal-bosque mixto atlántico.
Vegetación actual en las inmediaciones:
La vegetación bajo el viaducto prácticamente no existe, a excepción de algunas manchas de vegetación herbácea irregulares. En la margen oeste se halla bosque autóctono y en el norte plantación forestal de coníferas.
Observaciones
Se trata de recuperar la vegetación superficial para evitar la erosión hídrica.

DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Las laderas bajo el viaducto, sus estribos y las zonas de sombra de los tableros presentaban un aspecto mejorable debido a que la revegetación no tuvo el éxito deseado. Varios puntos presentaban tierra desnuda, síntomas de pérdida de suelo, erosión superficial y escasa integración visual de la infraestructura, especialmente observada desde la carretera GI-3920 que pasa por debajo.

La zona en cuestión, sobre relleno de limolitas procedente de la excavación de los túneles de la propia AP-1, presentaba zonas poco vegetadas. Esto se debía, en parte, a que la ejecución de las hidrosiembras se realizó en época no idónea, a la escasez de sustrato del terreno, y, sobre todo, a la dificultad añadida que supone el encontrarse bajo la sombra del propio viaducto. Así mismo, se observaron problemas de erosión superficial provocados por la escorrentía del agua, la apertura de una pista forestal y la presencia de zonas inestables de pronunciadas pendientes.

Ante esta situación, los principales objetivos de la actuación fueron:

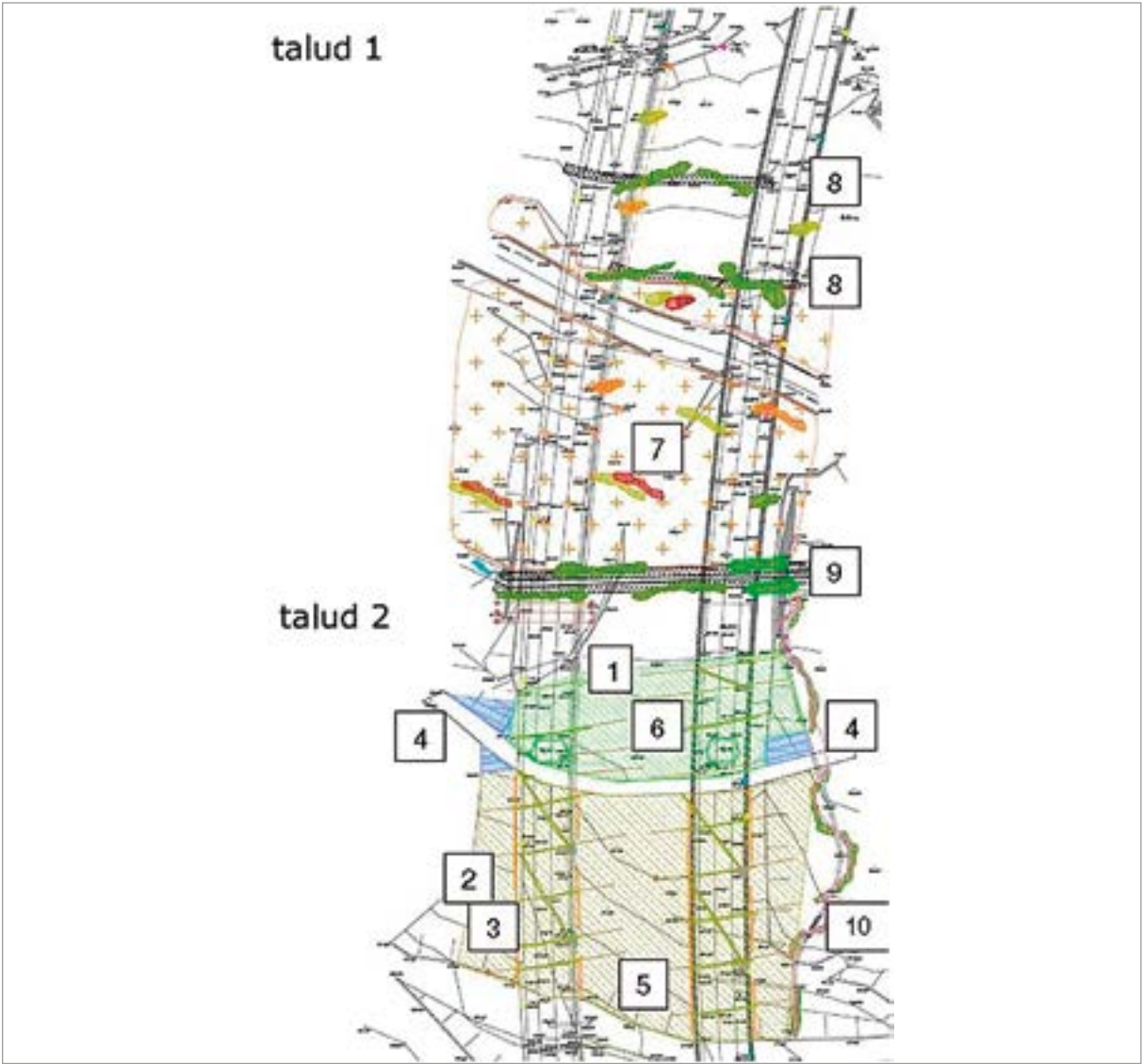
- Atajar los problemas de erosión y pérdida de suelo.
- Mejorar la estabilidad de los caminos de la zona de sombra del viaducto.
- Mejorar la funcionalidad y estabilidad del curso de agua que pasa bajo la estructura.
- Mejorar la integración paisajística y visual del área bajo el viaducto Basagoiti.

PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

A continuación, se detallan las diferentes actuaciones desarrolladas e indicadas en la imagen 55:

- 1. Control de la erosión y aprovechamiento de las aguas de lluvia bajo los drenajes mediante pozos de retención.
- 2. Control de la erosión y mejora de la humedad bajo el viaducto con drenajes de fajinas.
- 3. Revegetación de las áreas de sombra bajo los tableros con plantación en zanja de especies trepadoras aprovechando la fajina.
- 4. Estabilización del talud del camino a través de lechos de estacas.
- 5. Estabilización de suelos con elevada pendiente a través de la aplicación de hidromanta.
- 6. Estabilización de suelos de pendiente moderada mediante hidrosiembra enriquecida con sustrato.
- 7. Tratamiento paisajístico mediante la plantación de bosque: trasplante de parte del arbolado existente y plantación de arbustivas.
- 8. Integración de las escolleras del estribo norte mediante estaquillado.
- 9. Mejora y estabilización de la regata: estaquillado de la escollera y orla de ribera.
- 10. Integración de la bajante de hormigón del estribo sur.

Imagen 55. Planta con soluciones propuestas.Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.



TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA EJECUTADAS

Técnicas mixtas de estabilización:

Revegetación de escollera (8) y (9). No se trata de una escollera vegetada o vegetalizada sino de la revegetación a posteriori de una escollera. Se ha podido llevar a cabo debido al poco espesor de la escollera, que es menor a un metro y permite que se llegue al trasdós de la estructura (imagen 56).



Imagen 56. Esquema de estaquillado en escollera. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.

Técnicas de drenaje:

Fajinas de drenaje (2) bajo los tableros y revegetación bajo los mismos con **plantación de trepadoras y rastreras (3).**

Las fajinas parten desde la parte exterior del tablero y recogen también el agua de los pozos de retención lo que permite mantener las trepadoras que se han plantado junto a las fajinas y que recubren las zonas bajo los tableros.

Imagen 57. Esquema de implantación de fajinas y lechos de ramaje/fajina transversal en ejecución. . Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.



Lechos de ramaje (4). Se han realizado para la estabilización de la pista forestal mediante estaquillado de *Salix atrocinerea*.



58. irudia. Adar-mailak jartzeko lanaren eskema. Iturria: P. Sangalli – SCIA SL

Técnicas de recubrimiento:

Hidromanta (5). Se llevó a cabo una hidromanta sobre la superficie de limolitas, en las zonas de mayor pendiente (40°). Se emplea debido a la ausencia de tierra vegetal.

Hidrosiembra enriquecida (6). Se lleva a cabo una hidrosiembra enriquecida con sustrato (turba en este caso) para conseguir un suelo más orgánico. Se empleó en las zonas de menor pendiente.

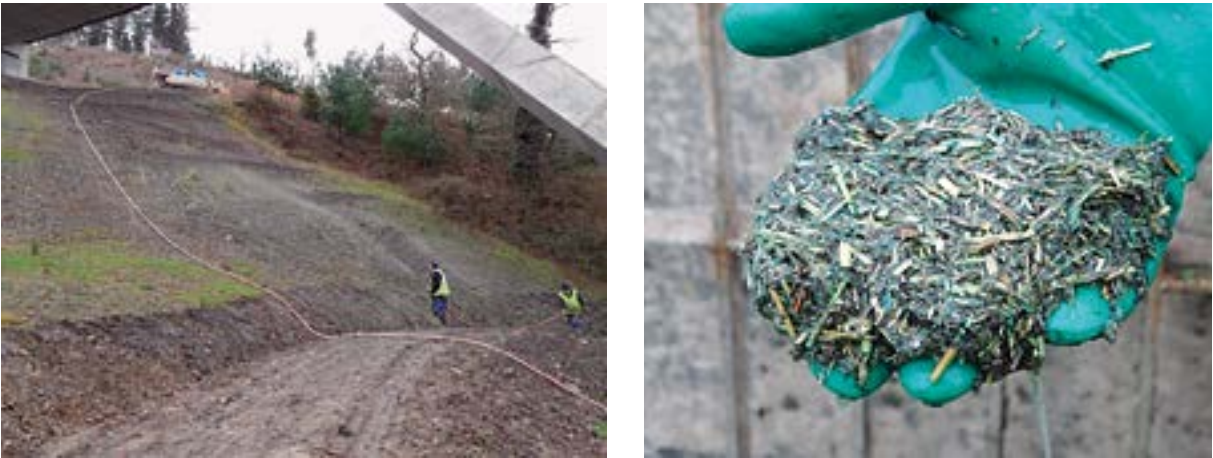


Imagen 59. Hidromanta.. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.

Plantaciones:

- Especies arbóreas: *Quercus robur*, *Acer campestre*, *Betula pendula*, *Fraxinus excelsior*.
- Especies arbustivas: *Crataegus monogina*, *Corylus avellana*, *Cornus sanguinea*, *Euonymus europaeus*.
- Especies empleadas en las estructuras: *Salix atrocinerea*, *Cornus sanguinea* y *Euonymus europaeus* en escollera; y *Salix atrocinerea* en la escollera de la regata.
- Especies trepadoras plantadas en fajinas: *Hedera helix*.

COMENTARIOS A LA EJECUCIÓN

La ejecución se llevó a cabo en tres semanas durante los meses de enero a febrero de 2013.

Durante la ejecución el tiempo fue frío y lluvioso, por lo que para proyectar la hidromanta se tuvo que esperar a que las lluvias pararan, evitando así el lavado del material proyectado. La obra también se detuvo durante tres días a causa de una nevada.

Como resultados de la intervención se observa que la hidromanta ha permitido mejorar considerablemente la cobertura vegetal, siendo la primera ocasión en la que se utilizó esta técnica en Gipuzkoa. Por su parte, las fajinas han permitido llevar el agua a las especies trepadoras plantadas, consiguiendo una buena revegetación bajo tableros. Así mismo, han contribuido a frenar la erosión bajo los tableros provocada por los drenajes longitudinales de estos. Los lechos de ramaje han estabilizado las erosiones y desprendimientos puntuales junto al camino.

Imagen 60. Resultado de las técnicas de recubrimiento cuatro años tras la ejecución . Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.



Imagen 61. Funcionamiento de los pozos de recogida de agua y brotación de los lechos de ramaje un año tras la ejecución de las obras . Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.



5.1 EJEMPLOS DE ACTUACIONES MEDIANTE EL EMPLEO DE BIOINGENIERÍA

5.1.3 CASO DE ESTUDIO 3: Estabilización de un desprendimiento en una pista forestal

DATOS CLAVE

Carretera: Pista forestal
Localización: Berastegi, dentro del parque natural de Leizaran
Coordenadas UTM: X 562332,616; Y 4759606,854
Técnicas empleadas:
Entramado vivo doble tipo Krainer
Enrejado vivo
Estaquillado
Entramado vivo doble tipo Krainer modificado
Siembras y plantaciones
Ejecución: febrero 2008. 4 semanas
Área afectada: 100 m²
Propiedad de los terrenos afectados:
Diputación Foral de Gipuzkoa
Proyecto: SCIA S.L. y Ekolur SLL
Promotor: Departamento de Montes de la Diputación Foral de Gipuzkoa



Imagen 62. Localización desprendimiento

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE INTERVENCIÓN

El deslizamiento a estabilizar afectaba a una pista forestal dejándola impracticable para la saca de madera. El origen más probable del deslizamiento fueron la excesiva pendiente de la ladera, junto con unas lluvias intensas y el tipo de terreno existente, con poca cohesión. El deslizamiento tuvo lugar tras el paso de un camión cargado con los troncos y afectó tanto a la parte superior como a la inferior de la pista.

En total, la superficie del deslizamiento era de unos 100 m². La longitud del talud de 13 m y con un desnivel medio de 7 m. La ladera tiene una pendiente media entre 45° y 55° y antes del desprendimiento, se encontraba parcialmente vegetada con *Larix decidua* que sirvió para la obra, fresnos y *Salix atrocinerea*.

Imagen 63. Situación del deslizamiento desde la parte baja y desde la parte alta del talud. Fuente: P. Sangalli -SCIA S.L. – EKOLUR S.L.



CARACTERIZACIÓN

Superficie de la intervención: 100 m².
Altitud sobre el nivel del mar:
Rango de carretera: Pista forestal.

Datos climáticos

Tipo de clima: templado-atlántico.
Precipitación máxima anual: 309,7 mm noviembre.
Precipitación mínima anual: 84,7 mm agosto.
Precipitación media anual: 2.232 mm
Temperatura media mínima: 2,3 °C, mes febrero.
Temperatura media máxima: 23,2 °C mes agosto.
Temperatura media anual: 11,5 °C.
Evapotranspiración potencial: de 670 mm.

Geología

Litología dominante: pizarras y areniscas plegadas.

Edafología

Tipo de suelos: suelos de naturaleza coluvial arcillosos, de elevado espesor, bolos y gravas con algo de arena de compacidad medianamente densa a densa.

Geotecnia

Ángulo de rozamiento interno del suelo (°): 29°.

Caracterización de la ladera

Pendiente: 45° - 55°.
Orientación: Sur.

Breve caracterización botánica de la zona de intervención

Vegetación potencial:
Robledal-bosque mixto atlántico.

Vegetación actual en las inmediaciones:

- **Estrato arbóreo:** plantaciones forestales de *Larix decidua*.
- **Estrato arbustivo:** *Ulex europaeus*, *Salix atrocinerea*, y *Rubus ulmifolius*.

Observaciones

La intervención se llevó a cabo de urgencia debido a las adversas condiciones meteorológicas y a la localización del deslizamiento, en pleno parque natural y con muy difícil acceso, a más de seis kilómetros de la primera pista hormigonada.

Todo el material empleado se obtuvo de las inmediaciones de la obra.

El personal que intervino en la ejecución de los trabajos no tenía experiencia previa en técnicas de Bioingeniería del Paisaje y fue formado durante el desarrollo de la misma obra.

Se trataba del mismo equipo que llevaba a cabo la explotación forestal para Diputación Foral de Gipuzkoa.

DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Se planteó una solución desde la bioingeniería al encontrarse la zona dentro del parque natural de Leizaran, ser terrenos públicos y estar las pistas impracticables, lo que dificultaba la resolución con otras técnicas. Toda la obra se llevó a cabo con el material presente en la zona, no siendo necesario ningún aporte exterior, lo que consideramos de interés en la resolución de las posibles interferencias entre infraestructuras y pistas forestales, tan abundantes en la provincia de Bizkaia.

La saturación de los materiales que constituyen la ladera natural después del periodo de lluvias implica un incremento de peso de la masa potencialmente inestable y una menor resistencia al corte.

Esta obra se llevó a cabo de urgencia, por lo que no se hicieron estudios de detalle, sino que se partió de la información topográfica, el análisis de los materiales geológicos in situ, un dimensionamiento de las actuaciones previstas y una búsqueda de materiales en las proximidades de la obra, dada las dificultades de acceso a la misma.

PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

Dadas las características del deslizamiento se optó por una estabilización al pie mediante un entramado vivo doble tipo Krainer sobre el que se apoyan los enrejados vivos que tienen como función la de recuperar la ladera. En la parte alta, con objeto de estabilizar la pista se construye un segundo entramado de madera modificado en su parte superior de manera que pueda soportar el tránsito de camiones.

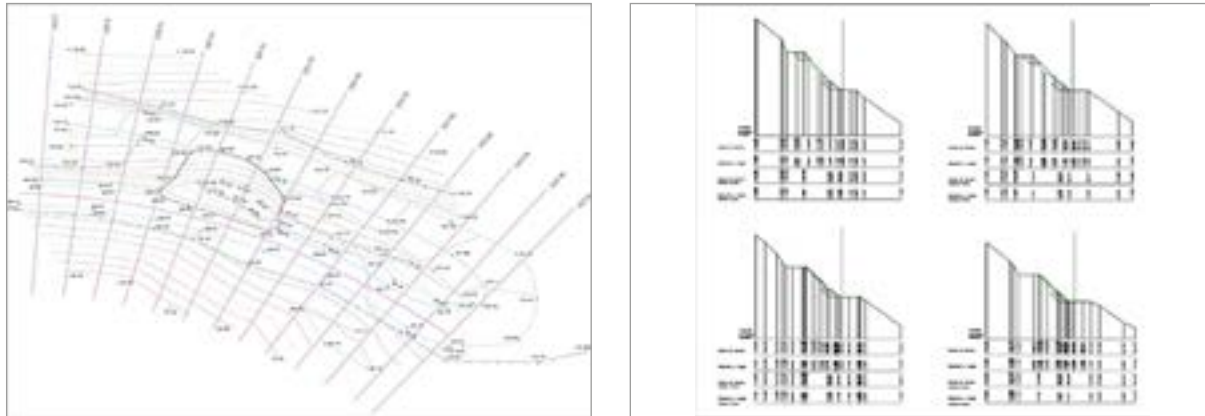


Imagen 64. Topografía del desprendimiento, perfiles de intervención. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L. - EKOLUR S.L.L.

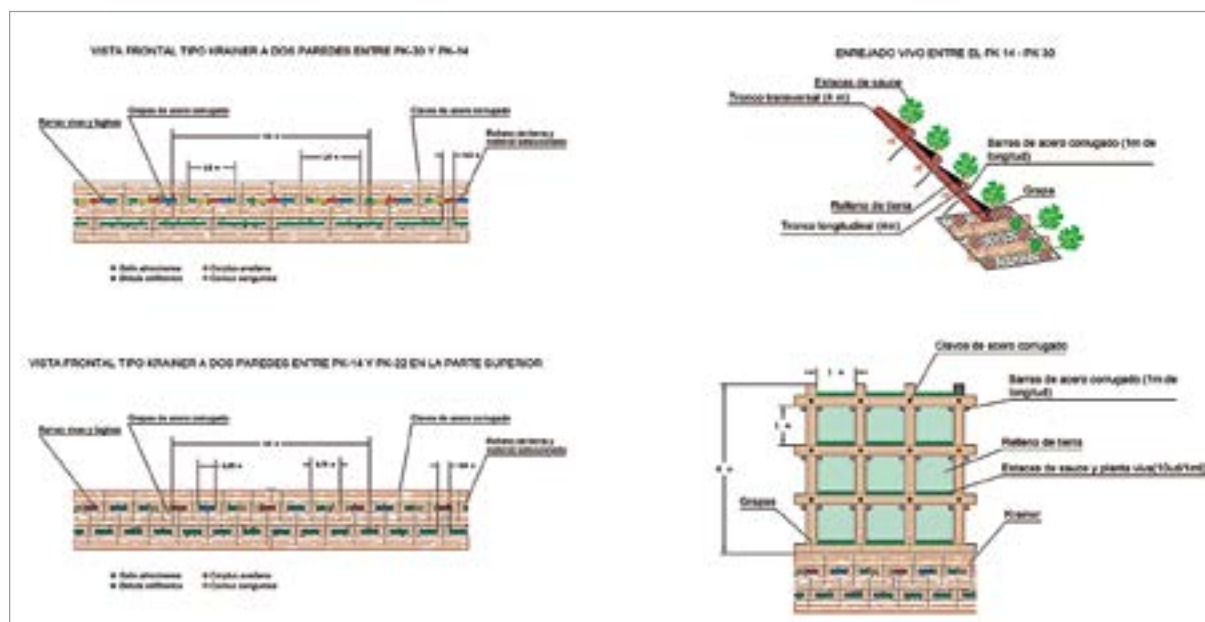


Imagen 65. Técnicas propuestas. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L. - EKOLUR S.L.L.

A continuación, se detallan las diferentes actuaciones desarrolladas:

1. Reperfilado del talud.
2. Excavación para la cimentación.
3. Estabilización al pie del talud y donde el talud supera la pendiente de estabilidad mediante entramado vivo a doble pared tipo Krainer con una longitud de 16 metros y una altura de un metro y medio. Se cimenta directamente en tierra.
4. Construcción de enrejado vivo de un total de cuatro módulos de 5 x 4 metros cada uno.
5. Construcción de un entramado superior de medio metro a un metro de longitud con el nivel superior reforzado para absorber el peso del tránsito rodado.
6. Siembra y plantaciones.

TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA EJECUTADAS

Técnicas mixtas de estabilización:

Entramado vivo a doble pared tipo Krainer colocado al pie del talud y en la zona alta para recuperar la pista.

Enrejado vivo para recuperar la pendiente del talud 50° (imagen 66).

Técnicas de recubrimiento:

Se llevó a cabo una siembra de herbáceas gramíneas y leguminosas y una plantación de arbustos.

- **Especies arbustivas plantadas:** *Corylus avellana*, *Cornus sanguinea*, *Euonymus europaeus*.
- **Especies empleadas en las estructuras:** *Salix atrocinerea* de las inmediaciones de la obra.
- **Madera empleada en las estructuras:** *Larix decidua* de las inmediaciones de la obra.



Imagen 66. Entramados y enrejados en ejecución febrero 2008. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.



Imagen 67. Imagen del talud una vez brotado.

COMENTARIOS A LA EJECUCIÓN

La obra se llevó a cabo con materiales procedentes de las inmediaciones de la obra, tanto la madera, apeas de Larix decidua; así como, Salix atrocinerea presente en el talud. Las estaquillas utilizadas en las estructuras también proceden de las inmediaciones de la obra.

Las zonas distales, de menor diámetro se emplearon en los enrejados vivos mientras que los de mayor diámetro se utilizaron para el entramado de base.

El personal encargado de la ejecución fue el equipo de forestalitas presentes en la explotación y que no tenían experiencia previa en bioingeniería.

La obra se desarrolló en cuatro semanas, estando una semana parada a causa de una fuerte nevada que impidió el acceso a la obra.

Imagen 68. Situación en primavera 2009. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.



5.1 EJEMPLOS DE ACTUACIONES MEDIANTE EL EMPLEO DE BIOINGENIERÍA

5.1.4 CASO DE ESTUDIO 4: Estabilización de desprendimientos en senda ciclable de Arrigorriaga, zona ubicada entre los polígonos Agirre y Martiartu (Bizkaia)

DATOS CLAVE

Carretera: Senda ciclable
Localización: Arrigorriaga
Coordenadas UTM: X 562332,616; Y 4759606,854
Técnicas empleadas:
Entramado loricata
Entramado de madera simple
Mulching paja y manta biodegradable de coco
Siembras y estaquillados
Ejecución: noviembre 2022. 5 días
Área afectada: 205 m²
Propiedad de los terrenos afectados:
Diputación Foral de Bizkaia
Proyecto: Rafael Etxebarria
Promotor: Departamento de Carreteras de la Diputación Foral de Bizkaia



Imagen 69. Localización de desprendimientos

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE INTERVENCIÓN

La actuación consiste en la estabilización de tres desprendimientos que afectan a la senda ciclable de Arrigorriaga (Bizkaia). La rotura tiene lugar en unos taludes con una baja cobertura vegetal, tras las intensas lluvias caídas en noviembre de 2021, y afecta a una superficie variable entre 3-7 metros de anchura y 24 metros de longitud. La diferencia de cotas entre el pie y la cabeza del deslizamiento es de unos 7 metros. La ladera tiene una pendiente media de 35° a 45°.



Imagen 70. Situación de deslizamientos y la ausencia de elementos vegetales que anclen los suelos en profundidad. Fuente: R. Etxebarria. Bidegorri Arrigorriaga. DFB

CARACTERIZACIÓN

Superficie de la intervención: 205 m².
Altitud sobre el nivel del mar: +62 m.
Rango de carretera: Senda ciclable.

Datos climáticos
Tipo de clima: templado-atlántico.
Precipitación máxima anual: 153 mm noviembre.
Precipitación mínima anual: 53 mm agosto.
Precipitación media anual: 1.060 mm
Temperatura media mínima: 5 °C, mes enero.
Temperatura media máxima: 26 °C mes agosto.
Temperatura media anual: 16,5 °C.

Evapotranspiración potencial: de 600 a 700 mm.

Geología
Litología dominante: alternancia de areniscas y margas, rellenos antropogénicos para conformación de rotonda y ramales.

Edafología
Tipo de suelos: rellenos arcillosos y suelos de naturaleza coluvial, bolos y gravas arcillosos con algo de arena.

Geotecnia
Ángulo de rozamiento interno del suelo (°): 35°.

Caracterización de la ladera
Pendiente: 45° - 35°.
Orientación: Noreste.

Breve caracterización botánica de la zona de intervención

Vegetación potencial:
Robledal-bosque mixto atlántico.

Vegetación actual en las inmediaciones:
- *Estrato arbóreo:* plantaciones forestales de *Pinus radiata* y ejemplares aislados de *Fraxinus excelsior*, *Salix atrocinerea*, *Pinus radiata*, *Populus tremula*, *Quercus rubra*, *Robinia pseudoacacia*.

Observaciones
Se observa la surgencia de agua a pie de relleno por posible mal drenaje de plataforma de vial de acceso a la autopista AP-68.

La zona está afectada por vibraciones por el paso de tráfico pesado.

DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

El estudio de campo realizado revela que la causa que provoca el deslizamiento es el mal funcionamiento de la cuneta de coronación que no recoge correctamente el agua durante fuertes precipitaciones y/o presencia de surgencias hipodérmicas en zonas transmisivas del relleno.

También resaltar la posible influencia provocada por las vibraciones generadas por el paso de vehículos pesados que afectan a la zona de rellenos. Estos rellenos ofrecen una heterogeneidad grande pudiendo generar zonas de afluencia de agua o comportamientos geomecánicos variables.

En las tres zonas deslizadas se observa la ausencia de arbustos o árboles jóvenes; es decir, ausencia de elementos que ejercen una función de anclaje pasivo, que aumente la resistencia al corte de los suelos que conforman el talud. Indicar la presencia de tres zonas con escolleras en zonas colindantes.

PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

Los deslizamientos se han estabilizado mediante técnicas mixtas de estabilización, entramados y enrejados principalmente. En el gráfico de la página siguiente se indican las técnicas seleccionadas para corregir los deslizamientos presentes en la senda ciclable.

A continuación, se detallan las diferentes actuaciones desarrolladas:

- 1. Reperfilado del talud. Compensación, excavación y relleno.

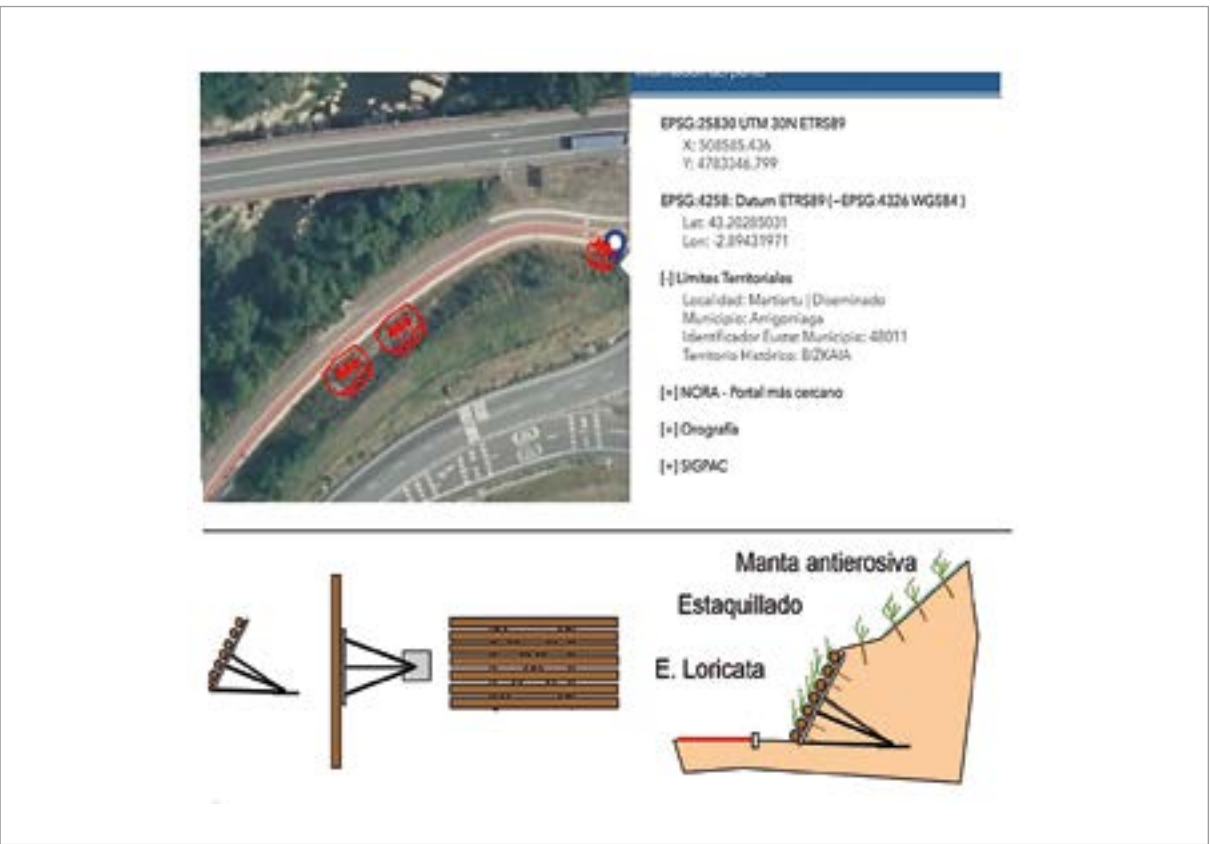


Imagen 71. Localización del deslizamiento 2022 y perfil de intervención

- 2. Estabilización al pie del talud y donde el talud supera la pendiente de estabilidad mediante entramado loricata revegetado.
- 3. Construcción de elementos de transición, entramado de madera simple en el punto de encuentro con escollera existente.
- 4. Recubrimiento superficial mediante manta biodegradable de coco y acolchado de paja, siembras y estaquillado de sauces con objeto de incrementar la resistencia al corte y el bombeo de aguas hipodérmicas.

TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA EJECUTADAS

Técnicas mixtas de estabilización:

Entramado loricata colocado al pie del talud.

Imagen 72. Montaje de estructura loricata. Fuente: R. Etxebarria. Bidegorri Arrigorriaga. DFB



El entramado loricata es un muro anclado compuesto por una estructura en acero, fijada a una placa de cimentación, que sirve de soporte a troncos de madera. De este modo, se genera una cara vista en la que se insertan estacas vivas de especies autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa.



Imagen 73. Loricatas tras seis meses desde su instalación. Fuente: R. Etxebarria. Bidegorri Arrigorriaga. DFB

Entramado de madera simple para poder enlazar y dar continuidad al talud. Este elemento refuerza la zona entre una escollera existente y la estructura loricata.



Imagen 74. Escollera existente, entramado de madera simple de transición y entramado loricata. Fuente: R. Etxebarria. Bidegorri Arrigorriaga. DFB



Imagen 75. Materiales y maquinaria empleada durante la obra. Fuente: REG

COMENTARIOS A LA EJECUCIÓN

La elección de la técnica ha venido marcada por la necesidad de evitar daños en el firme de la senda ciclable que presenta un slurry antideslizamiento menos resistente que las capas de asfalto convencionales. Este hecho ha requerido la selección de la técnica, que soporte los empujes de las tierras pero que permita un transporte liviano de las estructuras y una necesidad de maquinaria de excavación ligera. Además, se ha tenido en cuenta el criterio de sostenibilidad, no sacar excedentes fuera del tajo en ejecución, lo que se traduce en el ajuste de la cubicación de volúmenes a excavar con los requerimientos de rellenos destinados al entramado, en función del posicionamiento de la estructura.

Todas las estaquillas utilizadas en las estructuras proceden de las inmediaciones de la obra en el momento de parada vegetativa ya que la obra se ha realizado en noviembre.

La obra se desarrolló en cinco días, requiriendo el corte de un carril de la senda por requisitos de seguridad. La ejecución se ha visto ralentizada por la necesidad de cubrir la senda, para no dañarla, y por el traslado manual de las estructuras y troncos.

5.2 COMPARATIVA ENTRE INGENIERÍA CIVIL CLÁSICA Y BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE

A continuación, se establece una comparativa entre las posibles actuaciones de Bioingeniería del Paisaje y las técnicas de Ingeniería Civil.

Tabla 7. Tabla comparativa ingeniería civil y bioingeniería. Fuente: Cornellini P. Modificada por P. Sangalli y G. Tardío

Mecanismo de rotura o acción destabilizante	Actuaciones con técnicas tradicionales de ingeniería civil	Actuaciones con técnicas de bioingeniería del paisaje	Otras actuaciones
Colapso del macizo	Anclajes, atirantado, pantallas dinámicas, galerías de desprendimiento	Red metálica con geotextil y revegetación, barreras de tierra armada vegetada	Regularización de la ladera (retirada de bloques inestables), reperfilado de taludes
Caída de bloques por vuelco (toppling)	Anclajes, atirantado, muros de contención	Tratamiento y revegetación de los suelos y materiales deslizados	Reperfilado (modificación) del macizo rocoso
Deslizamiento planar		Sistema de drenaje del tipo Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)	Trincheras o cunetas de drenaje profundas con sistemas de monitoreo (inclinómetro y piezómetro)
Deslizamiento rotacional	Muros de contención, atirantado (nailing), micropilotes.	Entramado vivo de madera, escollera vegetada, control de la erosión, recuperación de la ladera con tierra armada, revegetación de la ladera tratada	Modificación de la pendiente de la ladera
Coladas	Muros de contención	Entramado simple de madera, creación de compartimentos en ladera con empalizadas longitudinales y transversales, revegetación, protección de superficie con herbáceas o acolchado	
Deslizamientos locales	Escolleras	Geosintéticos y material de fibras naturales con efecto antierosivo, entramados simples, enrejado vivo, compartimentos en ladera mediante acordeonados o empalizadas, revegetación y protección superficial con herbáceas o acolchado	
Movimientos en masa en torrentes	Diques trasnversales en hormigón	Diques de madera y piedras	Compartimentos de laminación y zonas inundables renaturalizadas, barreras de cable de parada de sedimentos
Erosión en ladera	Muros de estabilización	Enrejado vivo, entramado vivo de madera a pared simple o doble, Latina, Aquila o Loricata	Tierra armada con paneles metálicos con manta orgánica o geosintético y revegetación
Erosión en márgenes fluviales	Muro en pie, defensas en hormigón, gaviones	Defensas vegetadas, escollera, técnicas de cubrición, revegetación, entramados vivos	Actuaciones sobre la hidromorfología del cauce, protección de los márgenes fluviales, renaturalización del cauce e integración paisajística



6. PROYECTO DE BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE

Un proyecto en el que intervienen técnicas de bioingeniería del paisaje se caracteriza por ser un proyecto multidisciplinar, que requiere la intervención de diversos especialistas, y el análisis de la zona de intervención

6.1 ANÁLISIS PRELIMINAR PARA PROYECTAR BIOINGENIERÍA

La realización de un proyecto en el que intervienen técnicas de bioingeniería del paisaje se caracteriza por ser un proyecto multidisciplinar, que requiere la intervención de diversos especialistas, y el análisis de la zona de intervención.

El análisis preliminar requiere disponer de la información de cada uno de los ámbitos descritos en este apartado: climática, del ecosistema, edáfica, legislativa, morfológica, topográfica y de usos del suelo y actividades económicas. Esta es una relación bastante exhaustiva de los aspectos que deben consultarse para realizar correctamente las obras de bioingeniería del paisaje. El técnico responsable del proyecto deberá particularizar esta relación para cada caso concreto y conocer todos los antecedentes y estudios realizados de la zona de actuación.

A continuación, se enumeran los principales elementos a tener en cuenta para desarrollar el proyecto de bioingeniería.

Tabla 8. Áreas de análisis de la ingeniería clásica y las áreas más específicas de la Bioingeniería

ÁMBITOS DE ANÁLISIS DE LA INGENIERÍA CIVIL "CLÁSICA"	ÁREAS DE ANÁLISIS "ESPECÍFICAS" DE LA BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE
- LITOLOGÍA - GEOMORFOLOGÍA - GEOMECÁNICA - ANÁLISIS DE ESTABILIDAD - TOPOGRAFÍA - HIDRÁULICA (vías navegables) - HIDROLOGÍA - TECNOLOGÍA DE MATERIALES	- EDAFOLOGÍA - MICROCLIMA - BOTÁNICA, ECOLOGÍA VEGETAL - ROPIEDADES BIOTÉCNICAS DE LAS ESPECIES VEGETALES - INTERFERENCIA CON LA FAUNA SILVESTRE LOCAL (la presencia de animales, ganado o fauna silvestre puede dañar las obras) - INTERFERENCIA CON ESTRUCTURAS Y ACTIVIDADES HUMANAS (que pueden afectar a las plantas) - PRESENCIA DE CONTAMINANTES (en el suelo, el agua y el aire), que pueden afectar a la vegetación)

Mucha de esta información es propia del análisis de proyecto de ingeniería civil, al que se le suman otros análisis específicos de la bioingeniería del paisaje.

6.1.1 Información climática

Se tendrán en cuenta las características macroclimáticas y microclimáticas, considerando diversos parámetros para evaluar el microclima.

Para la valoración del microclima se podrán considerar los parámetros:

- Pluviometría media, distribución y variabilidad intra e interanual, intensidad de lluvia máxima horaria. Duración de los períodos de sequía y de fuertes precipitaciones, riesgo de fenómenos climáticos extremos.
- Humedad relativa del aire y probabilidad de ocurrencia de nieblas.
- Temperaturas medias, máximas y mínimas. Duración de los períodos de heladas a lo largo del año.

- Viento: dirección, fuerza y persistencia.
- Radiación solar.
- Localización y zona climática: continentalidad, distancia al mar, altitud, exposición.

6.1.2 Información geológica

Se llevará a cabo un análisis de estabilidad que abarcará la geometría, los parámetros resistentes del terreno y la presencia y presión de agua; así como, la evaluación de los procesos activos naturales como la erosión, los desprendimientos, los deslizamientos y la solifluxión.

Para la valoración del peligro de erosión se podrán considerar los parámetros geotécnicos siguientes:

- Altura, superficie y orientación del talud o ladera.
- Inclinación del talud.
- Dimensión de las partículas del terreno.
- Ángulo de rozamiento del terreno y del mismo con los materiales aportados.
- Cohesión del terreno, peligro de deslizamiento de parte del terreno.
- Indicadores de presencia de agua, posición del nivel freático.
- Presencia de elementos nocivos o agresivos.
- Propiedades geomecánicas de resistencia y compresibilidad.

Para el análisis de la estabilidad de taludes en suelos se podrán considerar los parámetros y consideraciones geotécnicas siguientes:

- Métodos de cálculo: Ordinario (Fellenius), Bishop, Janbu, Método general de equilibrio límite, etc.
- Geometría y estratigrafía: Múltiples tipos de suelos, parcialmente sumergidos, de espesor variable, estratos discontinuos, capas impenetrables, grietas de tracción secas y saturadas.
- Superficie de deslizamiento: Circular, compuesta, total de rotura, por bloques.
- Presión hidrostática.
- Propiedades de los suelos: Tensiones totales y efectivas, resistencia al corte, materiales impenetrables (lechos rocosos), criterios de rotura bilineales, incrementos de la cohesión con la profundidad, resistencia a la corte anisótropa, criterios de rotura específicos.
- Cargas: Rellenos, bulones, anclajes, bermas de carga al pie del talud, cargas sísmicas.

6.1.3 Información edáfica

En cuanto a las características del suelo, se evaluará la permeabilidad y el grado de alteración tanto del suelo como del relieve. Para la valoración del suelo se podrán considerar los parámetros:

- Espesor de la capa de suelo.
- Textura y estructura.
- Reacciones del suelo (valor del pH).
- Grado de humedad del suelo.
- Contenido de nutrientes, de carbonatos y en materia orgánica.
- Contenido de metales pesados y sustancias tóxicas.

El análisis preliminar requiere disponer de la información de cada uno de los ámbitos descritos en este apartado: climática, del ecosistema, edáfica, legislativa, morfológica, topográfica y de usos del suelo y actividades económicas

Se realizará un análisis detallado de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, teniendo en cuenta parámetros clave como la vegetación y la fauna presentes en el área de estudio

- Permeabilidad del suelo y capacidad de retención de agua.
- Microfauna y microflora.
- Disposición y composición estratigráfica del suelo.
- Presencia de costras salinas o calcáreas, pedregosidad y erosionabilidad.

6.1.4 Hidrología de la ladera

Se lleva a cabo un estudio hidrológico para determinar los caudales de avenida para diferentes periodos de retorno en la cuenca que afecta al trazado. Este cálculo se lleva a cabo aplicando el método racional, que establece la generación de escorrentía en una determinada cuenca a partir de una intensidad de precipitación uniforme en el tiempo, sobre toda su superficie.

La metodología que se sigue es la siguiente:

- Delimitación de la cuenca drenante de la ladera a intervenir.
- Descripción de la morfología de la cuenca drenante, estableciendo su superficie, la longitud máxima y la pendiente.
- Determinación de los coeficientes de escorrentía en base a los diferentes usos del suelo identificados mediante fotografía aérea.
- Cálculo de caudales máximos en los diferentes periodos de retorno empleando el tiempo de concentración de Témez.
- Los datos de lluvias proceden de los coeficientes y de la metodología de la Instrucción de Carreteras 5.1.

La ecuación a aplicar es:

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{360}$$

Donde:

Q: Caudal máximo [m³/s]

C: Coeficiente de escorrentía, encontrarás algunos valores para cuencas rurales y urbanas

I: Intensidad de la Lluvia de Diseño, con duración igual al tiempo de concentración de la cuenca y con frecuencia igual al período de retorno seleccionado para el diseño [mm/h]

A: Área de la cuenca [Ha]

6.1.5 Información topográfica

El estudio topográfico comprenderá el análisis de la pendiente y desarrollo del terreno; así como, la determinación de la superficie real.

6.1.6 Información del ecosistema y análisis botánico

Se realizará un análisis detallado de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, teniendo en cuenta parámetros clave como la vegetación y la fauna presentes en el área de estudio.

Se llevará a cabo también un análisis botánico. El objeto del análisis botánico es el de determinar la situación de partida del lugar de intervención, su vegetación potencial e individualizar las especies autóctonas más idóneas en inventario florístico, determinando los taxones presentes en el estrato arbóreo, arbustivo y herbáceo.

Para la valoración de la vegetación se podrán considerar los parámetros botánicos siguientes:

- Análisis fitosociológico del área de intervención (caracterización mediante el método Braun-Blanquet de la composición de la vegetación actual y potencial del lugar de actuación).
- Determinación de las especies autóctonas más acordes, según los condicionantes edafoclimáticos y de su presencia o disponibilidad en las cercanías.
- Características biotécnicas de la especie (capacidad de desarrollo vegetativo, capacidad de consolidación del terreno (tipo de raíces: axonomorfa o fasciculada), flexibilidad, resistencia a la tracción, éxito de la reproducción vegetativa, etc).

También se tendrán en cuenta las siguientes variables:

- Características eco-fisiológicas de las especies (tolerancia a la sequía; al encharcamiento; a las condiciones edáficas de salinidad, a la presencia de cal, a la acidez; velocidad de crecimiento, etc).
- Facilidad de reproducción, trasplante y colonización.
- Combustibilidad e inflamabilidad.
- Estrategia ecológica: competición interespecífica en el periodo de establecimiento y colonización, tipo de estrategia de recolonización.

6.1.7 Otras informaciones

Se tendrán en cuenta además otras informaciones relevantes:

- **Legislativa.** Legislación de la Administración General del Estado, de las comunidades autónomas y entes locales que afectan.
- **Paisajística.** Análisis paisajístico del entorno.
- **Usos del suelo y actividades económicas.** Usos agrícolas, ganaderos, forestales, recreativos, talas de ribera, graveras, infraestructuras, obras hidráulicas.
- **Densidad de población y evolución** en las últimas décadas.
- **Planes de ordenación urbana** que afecten al tramo en estudio.
- **Otros aspectos** de valoración (históricos, culturales, ecológicos, etc.).

6.2 GEOTECNIA APLICADA A LA BIOINGENIERÍA

6.2.1 Introducción

Las obras de bioingeniería pueden cumplir funciones de contención y estabilización de laderas. Además, es importante destacar que los sistemas radicales de la vegetación desempeñan un papel crucial al fortalecer el terreno y aumentar su resistencia al corte. Por ello, es necesario conocer los aspectos fundamentales de la mecánica del suelo aplicables a este tipo de intervenciones. En particular, los conceptos de empuje del terreno, análisis de estabilidad de taludes y resistencia a cortante del terreno.

Es necesario conocer los aspectos fundamentales de la mecánica del suelo aplicables a este tipo de intervenciones. En particular, los conceptos de empuje del terreno, análisis de estabilidad de taludes y resistencia a cortante del terreno

En la mayoría de los casos, el empuje de tierras es la principal fuerza desestabilizante en las laderas. Por tanto, son las primeras fuerzas y presiones a determinar para el cálculo de las estructuras de contención

No se incluyen en las siguientes secciones conceptos básicos del tipo: grado de saturación del terreno, peso específico natural, peso específico seco, peso específico saturado, tensión total y tensión efectiva. Se recomienda al lector la lectura de cualquier manual básico de mecánica de suelo para aclarar cualquier duda relacionada con los anteriores conceptos. Así mismo, tampoco se incluyen en este capítulo los conceptos de análisis en condiciones drenadas, condiciones no drenadas ni sobre las distintas tipologías de test a cortante.

6.2.2 Empuje de tierras

En la mayoría de los casos, el empuje de tierras es la principal fuerza desestabilizante en las laderas. Por tanto, son las primeras fuerzas y presiones a determinar para el cálculo de las estructuras de contención.

Para el cálculo del empuje de tierras se pueden utilizar la teoría de Coulomb o la teoría de Rankine. En general, la más utilizada para el caso de muros jaula y entramados de madera es la teoría de Coulomb. Esto se debe a que la teoría de Rankine no tiene en cuenta la fricción entre el muro y la estructura y esta circunstancia, en el caso de un entramado de madera, hace a este método menos realista, aparte de dar lugar a sobreestimaciones del valor de los empujes.

Una estructura de contención recibe cargas procedentes de fuerzas puntuales, sobrecargas distribuidas (uniformemente o no) y la presión del terreno y el agua en su trasdós. En la imagen 76 se muestran estas variables.

La presión horizontal de las tierras se determina a partir de la fórmula:

$$s_H(z) = K_a \cdot s_V(z) = K_a \cdot z \cdot \gamma$$

Eq.1

Donde:

$\sigma_H(z)$ = presión horizontal de terreno a la profundidad z (kN/m²)

K_a = coeficiente de empuje (activo, en reposo o pasivo) (adimensional)

$\sigma_V(z)$ = presión vertical del terreno a la profundidad z (kN/m²)

z = profundidad (m)

γ = peso específico del terreno (kN/m³)

De acuerdo con la teoría de la mecánica de suelos, se pueden definir tres tipos de presión de tierras:

1. **Presión en reposo:** presión lateral existente en ausencia de deformación lateral de la estructura de contención. Esta situación se da cuando el elemento de contención tiene impedido su movimiento por la presencia de arriostramientos o anclajes (por ejemplo, en muros sótano, pantallas entibadas, muros con anclajes en su trasdós, etc.). Se calcula a partir del coeficiente de empuje en reposo.

2. **Presión activa:** se trata del empuje lateral que aparece cuando el muro, al deformarse, se aleja de las tierras lo que provoca que estas se descompriman. Tiene un valor inferior al de reposo. Se calcula a partir del coeficiente de empuje activo.

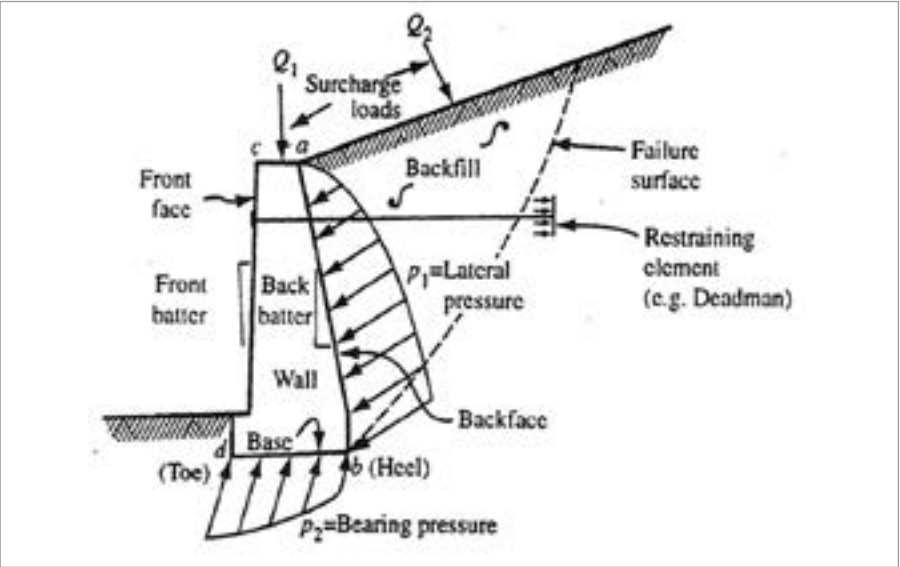


Imagen 76. Esquema de fuerzas de una estructura de contención. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.

3. **Presión pasiva:** presión lateral desarrollada cuando el muro se mueve hacia el relleno dando lugar a empujes superiores al de reposo (el muro se mueve en sentido inverso respecto al estado activo). Se calcula a partir del coeficiente de empuje pasivo.

Para el cálculo del empuje en el trasdós del muro se utiliza en general el coeficiente de empuje activo. Para los empujes en el intradós del muro se utilizará el coeficiente de empuje pasivo.

El valor de los coeficientes de empuje depende de la resistencia a cortante del terreno (función del ángulo de rozamiento interno y la cohesión), de la geometría del relleno, la geometría del trasdós del muro y el rozamiento entre el trasdós y el material de relleno (o terreno). El desplazamiento necesario para desarrollar la condición de empuje activo es relativamente pequeño mientras que el desplazamiento necesario para desarrollar el empuje pasivo es aproximadamente diez veces que el correspondiente al del empuje activo.

Para una primera aproximación, se puede utilizar la teoría de Rankine. De acuerdo con ella, cuando el relleno es horizontal, el coeficiente de empuje activo y pasivo para el caso de suelos granulares (arenosos) y cohesivos sigue las expresiones:

Naturaleza del suelo	Fórmula del coeficiente de empuje activo y pasivo
Suelo granular	$K_a = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2})$ Eq. 2
	$K_p = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$ Eq. 3
Suelo cohesivo	$K_a = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) - \frac{2c}{\sigma_v} \cdot \tan(45 - \frac{\phi}{2})$ Eq. 4
	$K_p = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) - \frac{2c}{\sigma_v} \cdot \tan(45 + \frac{\phi}{2})$ Eq. 5

Donde:

ϕ = ángulo de fricción interna del relleno o terreno (°)

c = cohesión del suelo (kN/m²)

σ_v = presión vertical a la profundidad z (kN/m²)

Para el cálculo del empuje en el trasdós del muro se utiliza en general el coeficiente de empuje activo. Para los empujes en el intradós del muro se utilizará el coeficiente de empuje pasivo

En el caso de los entramados de madera, la inclinación del trasdós está limitada ya que una excesiva inclinación limitaría mucho la capacidad del entramado para transmitir los empujes de las tierras a su base

En la anterior tabla, el efecto de reducción del empuje debido a la cohesión es expresada por el término sustraendo.

De acuerdo con lo anterior, la presión activa a la profundidad z estará expresada por:

$$p_a(z) = K_a \cdot \gamma \cdot z$$

Eq. 6

$$p_a(z) = K_a \cdot \gamma \cdot z - 2c \cdot \sqrt{K_a}$$

Eq. 7

De acuerdo con la teoría de Coulomb, el coeficiente de empuje activo para el caso general (talud con inclinación, trasdós de muro con inclinación y rozamiento entre trasdós y relleno) se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^2(\alpha) \cdot \cos(\alpha - \delta) \cdot \left[1 + \frac{\sin(\phi - \beta) \cdot \sin(\phi + \delta)}{\cos(\alpha - \delta) \cdot \cos(\alpha + \beta)} \right]^{0.5}}$$

Eq. 8

Donde:

δ = ángulo de fricción terreno-muro que es prácticamente igual al ángulo de fricción interna del terreno ($\delta=0,8$ o $0,9 \cdot$ ángulo fricción interna).

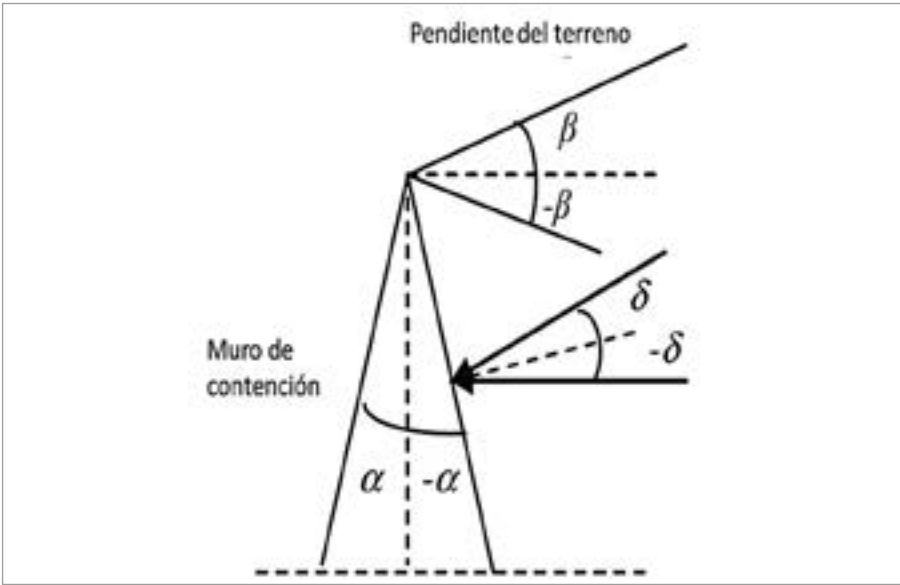
ϕ = ángulo fricción interna del terreno

α = inclinación del trasdós del muro

β = inclinación del talud del trasdós

Los ángulos y sus signos se muestran en la siguiente imagen:

Imagen 77. Convenio de signos utilizados en la fórmula de coeficiente de empuje activo (adaptado de Acharya, 2018)



En el caso de los entramados de madera, la inclinación del trasdós está limitada ya que una excesiva inclinación limitaría mucho la capacidad del entramado para transmitir los empujes de las tierras a su base. Por otro lado, una cierta inclinación mínima es necesaria para permitir la plantación y el desarrollo del material vivo empleado en la obra. Teniendo en cuenta las anteriores circunstancias, la inclinación del entramado (ángulo α de la anterior imagen) suele estar entre 10-35° (1H:5V a 1H:1,5V).

De acuerdo con lo anterior, el empuje activo (P_a) se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$P_a = K_a \cdot \gamma \cdot \left(\frac{q \cdot H}{\gamma} + \frac{H^2}{2} \right)$$

Eq. 9

Donde K_a es el coeficiente de empuje activo, H es la altura del muro y q es el valor de las sobrecargas existentes. En la anterior fórmula, la presencia de una sobrecarga uniformemente distribuida ha sido incorporada como una altura ficticia calculada como $z' = q/\gamma$.

En el cálculo de las presiones y empujes del terreno, se ha de incluir la casuística de cada caso; es decir, puede ser necesario incluir el empuje hidrostático del agua, el efecto sísmico de la zona, en el caso de laderas sumergidas, el uso del peso específico sumergido, etc. El punto de aplicación del empuje de tierras resultante se determinará también teniendo en cuenta las anteriores casuísticas.

En el caso de presencia del nivel freático, se utilizará el peso específico natural en las zonas por encima del mismo. Por debajo del nivel freático, se utilizará el peso específico sumergido del terreno. En esta misma zona se añadirá el empuje hidrostático del agua a la hora de obtener el empuje total. Es decir, por debajo del nivel freático (o en el caso de considerar un suelo totalmente saturado), se utilizará la siguiente expresión:

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot H^2 \cdot K_a + \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot H^2$$

Eq. 10

Donde H representa la altura bajo el nivel freático o la altura total del muro en caso de terreno completamente saturado. Es decir, se deben tener en cuenta tanto las presiones de las partículas sólidas como la presión del agua.

6.2.3 Análisis de estabilidad de taludes. Comprobaciones de estabilidad global

Los taludes se desmoronan debido a la insuficiencia mecánica del terreno frente a las tensiones a las que está sometido.

Por tanto, este tipo de análisis necesita conocer la siguiente información:

- Cargas actuantes sobre el talud. En general, la principal fuerza desestabilizante es el propio peso del talud.
- Métodos para transformar las anteriores cargas en tensiones internas del talud.

En el caso de presencia del nivel freático, se utilizará el peso específico natural en las zonas por encima del mismo. Por debajo del nivel freático, se utilizará el peso específico sumergido del terreno

Para transformar las cargas actuantes en tensiones internas se utilizan los modelos de comportamiento que son desarrollados en el campo de la geotecnia. Uno de los modelos más utilizados en ingeniería geológica es la ley de comportamiento de Mohr-Coulomb

- La respuesta del talud a estas tensiones internas.
- Los parámetros resistentes del terreno (la resistencia mecánica de los distintos suelos de la ladera).

Para transformar las cargas actuantes en tensiones internas se utilizan los modelos de comportamiento que son desarrollados en el campo de la geotecnia. Uno de los modelos más utilizados en ingeniería geológica es la ley de comportamiento de Mohr-Coulomb que tiene la siguiente expresión:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg}(\phi)$$

Donde:

τ = tensión tangencial (cortante) (kN/m²)

c = cohesión del suelo (sin raíces) (kN/m²)

σ = presión vertical (kN/m²)

ϕ = ángulo de fricción interna del suelo (°)

En la anterior fórmula, la cohesión y el ángulo de fricción interna son los parámetros resistentes del suelo. Es decir, son las variables que expresan la resistencia mecánica del terreno. Los términos τ y σ son las tensiones internas.

De la representación gráfica de la anterior ecuación en unos ejes coordenados, donde las abscisas sean las tensiones normales y las ordenadas las tensiones tangenciales, se obtiene la siguiente recta:

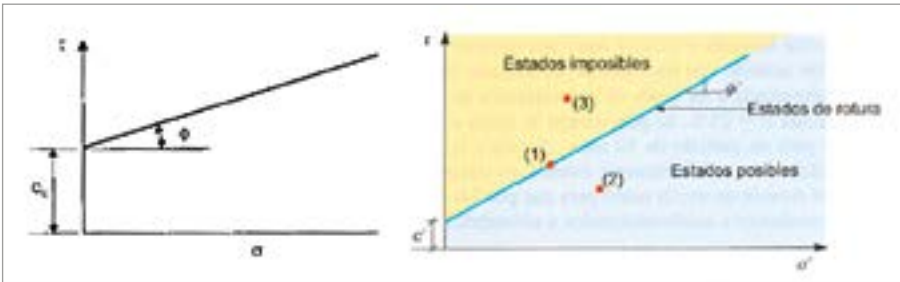


Imagen 78. En la imagen izquierda se representa la ley de comportamiento de Mohr-Coulomb. En la imagen derecha se indican los estados de tensión posibles y los que dan lugar a rotura o fallo del talud

Todo aquel estado de tensiones internas que quede por encima de la recta de resistencia se considera imposible; es decir, son estados inestables que darían lugar a fallo o colapso del talud.

Un parámetro con gran influencia en la resistencia de los taludes es la presión intersticial (presión del agua presente en el interior de los poros del suelo). La presión del agua se incorpora en la ley de Mohr-Coulomb dando lugar a la conocida ecuación de Terzaghi que tiene la siguiente expresión:

$$\tau = c + (\sigma - u) \cdot \operatorname{tg}(\phi)$$

Donde:

u = presión intersticial (kN/m²)

Se puede observar cómo, la presión intersticial, disminuye notablemente la resistencia del terreno. De ahí la importancia de contar con buenos drenajes en el diseño y estabilización de laderas y taludes. En los casos más sencillos, la presión intersticial se puede calcular como la presión estática que se determina a partir del peso específico del agua y la profundidad del punto que se analice. Para esto, es muy útil dibujar la red de flujo de agua (con sus líneas de corriente y sus líneas equipotenciales) en el interior del talud.

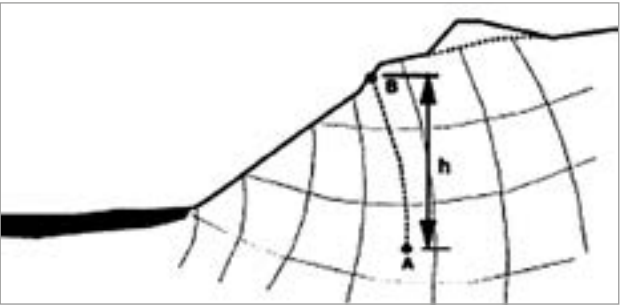


Imagen 79. Profundidad a utilizar para calcular la presión intersticial en un punto. En el ejemplo, el punto A

El valor de la presión intersticial se calcula como:

$$P_{INTERSTICIAL} = h \cdot \gamma_w$$

Donde:

h = profundidad del punto analizado obtenida a partir de la red de flujo

γ_w = peso específico del agua (kN/m³)

En caso de no disponer de la red de flujo se puede utilizar la profundidad obtenida directamente con respecto al nivel freático, aunque en este caso se estará sobreestimando el valor de la presión intersticial.

La comprobación de estabilidad global consiste en el análisis de estabilidad del conjunto terreno-entramado. Para ello, se suelen utilizar los métodos de equilibrio límite en los que se compara, para cada una de las superficies de deslizamiento analizadas, las fuerzas desestabilizantes y la resistencia a cortante del terreno. Esta comprobación es posterior a las anteriores comprobaciones de estabilidad externa; por lo que se asume que, el entramado es estable frente al vuelco y al deslizamiento. Estos métodos son los más utilizados en la práctica debido a su sencillez y porque, tras décadas de comparación y calibración de los modelos, el valor del coeficiente de estabilidad obtenido da buenas aproximaciones del valor real o exacto.

El método del equilibrio límite establece que la rotura del terreno se produce a través de una línea que representa la superficie de rotura. De esta forma,

La comprobación de estabilidad global consiste en el análisis de estabilidad del conjunto terreno-entramado. Para ello, se suelen utilizar los métodos de equilibrio límite en los que se compara, para cada una de las superficies de deslizamiento analizadas, las fuerzas desestabilizantes y la resistencia a cortante del terreno

La estabilidad del talud o ladera se expresa a partir del factor de seguridad o estabilidad. Este factor compara la resistencia máxima del talud con las fuerzas a las que está sometido. Valores superiores a la unidad expresan condiciones estables de ladera. Por el contrario, un valor del coeficiente de estabilidad inferior a la unidad expresan situaciones inestables de la ladera

se interpreta que la masa de terreno por encima de dicha línea se desplaza respecto la masa inferior, produciéndose así la rotura del terreno. Justo en el momento de producirse la rotura, la resistencia al corte a lo largo de la superficie de deslizamiento está movilizada, y el terreno se encuentra, en su totalidad, en equilibrio estático.

La estabilidad del talud o ladera se expresa a partir del factor de seguridad o estabilidad. Este factor compara la resistencia máxima del talud con las fuerzas a las que está sometido. Valores superiores a la unidad expresan condiciones estables de ladera. Por el contrario, un valor del coeficiente de estabilidad inferior a la unidad expresa situaciones inestables de la ladera.

$$FS = \frac{\text{Resistencia}_{\text{máxima}}}{\text{Resistencia}_{\text{movilizada}}}$$

Eq. 14

En la anterior fórmula, la resistencia movilizada a lo largo de la superficie de deslizamiento analizada es igual al valor de las solicitaciones (fuerzas externas) a las que está sometido el talud.

Un valor aceptable del factor de seguridad es de 1,3 para situaciones temporales y de 1,5 para situaciones permanentes. Aparte, el valor mínimo del factor de estabilidad adoptado también puede ser mayor si la rotura del talud pudiera dar lugar a graves pérdidas materiales o a riesgos para la salud humana.

En los métodos de equilibrio límite más modernos se discretiza el suelo en fajas o dovelas y se analiza el equilibrio de fuerzas y/o momentos en cada una de ellas. La generalización del anterior cálculo al conjunto del volumen del terreno nos permite obtener un valor del coeficiente de estabilidad del talud o ladera.

Mediante el uso de métodos de análisis por dovelas o fajas se consigue una mejor aproximación a la distribución de tensiones normales a lo largo de la superficie de deslizamiento. Aparte, el uso de dovelas facilita el análisis de taludes no homogéneos.

Imagen 80. Discretización del terreno inestable analizado en dovelas o fajas

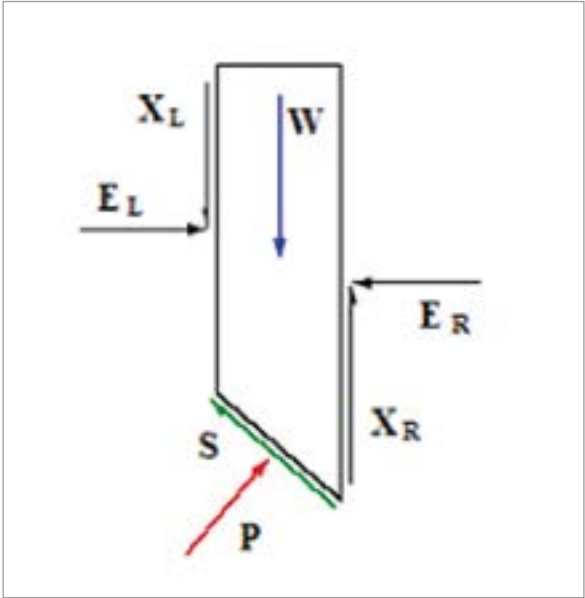
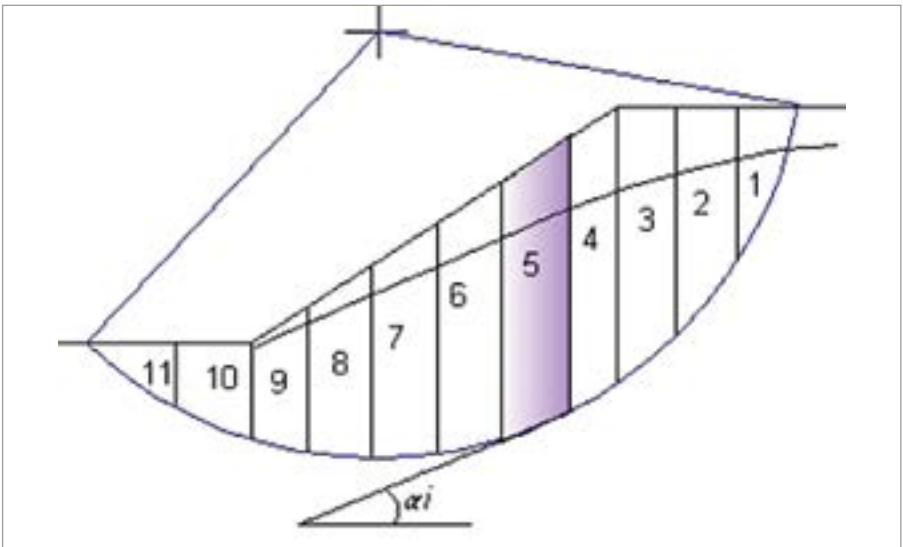


Imagen 81. Fuerzas incluidas en el análisis por dovelas en los métodos exactos. W son las cargas verticales externas, EL y ER son las fuerzas normales izquierda y derecha entre dovelas; XL y XR son las fuerzas verticales entre dovelas a izquierda y derecha; P y S son la fuerza normal y tangencial a la base de la dovela

En estos métodos, en cada una de las dovelas se analiza el equilibrio de fuerzas y/o momentos. En los métodos exactos se analizan los dos equilibrios.

En el análisis de fuerzas y momentos a nivel dovela se deben incluir los efectos de los refuerzos (e.g., anclajes, bulones, geosintéticos, etc.) y el efecto de refuerzo de las raíces.

En los métodos exactos, se plantean dos expresiones para comprobar la estabilidad en cada una de las dovelas. Una que muestra el equilibrio de fuerzas y otra que muestra el equilibrio de momentos. En las siguientes fórmulas se muestran las expresiones correspondientes al método general de equilibrio límite (MGEL) (Fredlund, 1970).

$$FS_{\text{FUERZAS}} = \frac{\sum (c' \cdot \beta \cdot \cos \alpha + (N - u \cdot \beta) \tan \phi \cdot \cos \alpha)}{\sum N \cdot \sin \alpha - \sum D \cdot \cos \theta}$$

Eq. 15

$$FS_{\text{MOMENTOS}} = \frac{\sum (c' \cdot \beta \cdot R + (N - u \cdot \beta) R \cdot \tan \phi)}{\sum W \cdot x - \sum N \cdot f \pm \sum D \cdot d}$$

Eq. 16

En la imagen 82 (en la página siguiente) se muestra el significado geométrico de las distintas variables.

La estabilidad de la ladera deberá estar asegurada a lo largo de la toda la vida de servicio de la obra de bioingeniería (ver esquema de FASES en epígrafe 3.2.2). En la primera fase de la obra (FASE 1), la estabilidad se conseguirá a través de los elementos inertes (naturales o manufacturados) utilizados en la obra. En la última fase (FASE 3), la estabilidad estará asegurada por el efecto de refuerzo hidromecánico de las comunidades vegetales desarrolladas en la zona de intervención.

En estos métodos, en cada una de las dovelas se analiza el equilibrio de fuerzas y/o momentos. En los métodos exactos se analizan los dos equilibrios. En el análisis de fuerzas y momentos a nivel dovela se deben incluir los efectos de los refuerzos (anclajes, bulones, geosintéticos, etc.) y el efecto de refuerzo de las raíces

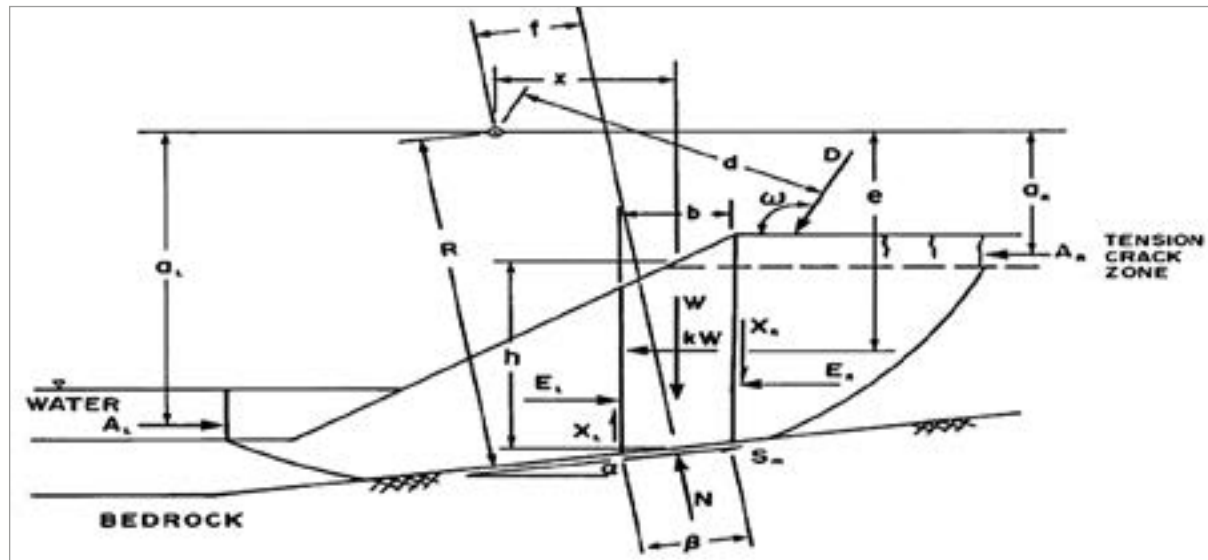


Imagen 82. Significado geométrico de las variables utilizadas en el MGEL (adaptado de Khran, 2004)

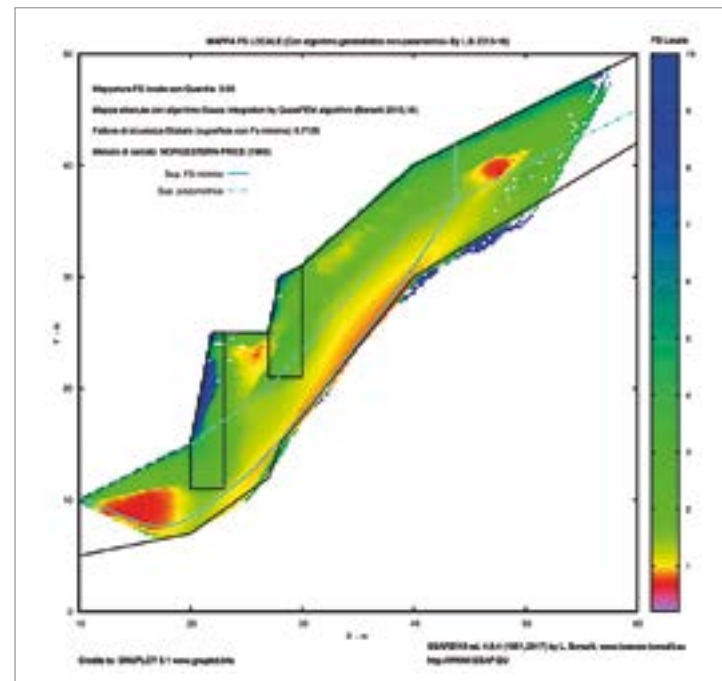


Imagen 83. Mapa mostrando los factores de estabilidad local obtenido con el programa ssap (Borselli, 2013)

En la práctica, para realizar el análisis de estabilidad se utilizan programas especialmente diseñados para ello. Existen diversos programas, tanto comerciales, para cuyo uso es necesario adquirir una licencia, como de uso libre, muy completos que permiten analizar la práctica totalidad de los distintos tipos de problemas de estabilidad de taludes. Un ejemplo de este último caso es el programa ssap (slope stability analysis program) desarrollado por un equipo de personas liderado por el profesor Lorenzo Borselli (<https://www.lorenzo-borselli.eu>) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (Méjico). Este programa se puede descargar libremente (<https://www.ssap.eu/>) y está continuamente actualizado por su equipo técnico.

En la práctica, para realizar el análisis de estabilidad se utilizan programas especialmente diseñados para ello

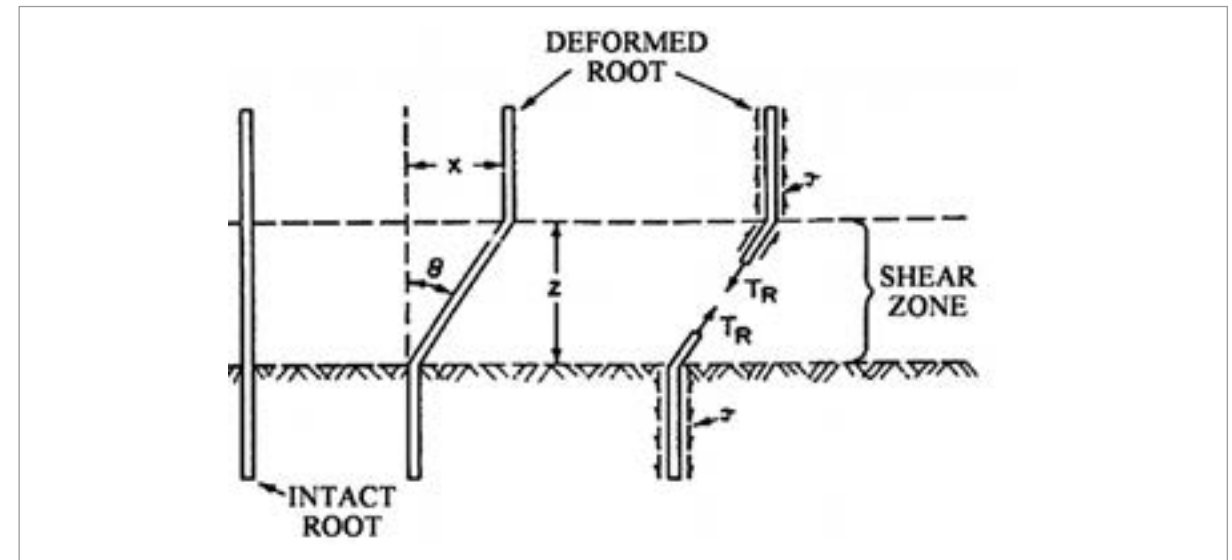


Imagen 84. Detalle del modelo de Wu et al (1979) y Waldron (1979). Fuente: Norris et al. (2008)

6.3 ESTABILIDAD DE LAS LADERAS VEGETADAS: PAPEL DE LA VEGETACIÓN EN LA ESTABILIDAD

6.3.1 Introducción

Los efectos positivos de la vegetación en la estabilidad de las laderas se deben tanto a la protección frente a procesos erosivos, como a la mejora de la propia estabilidad de los terrenos donde se desarrolla la vegetación.

A pesar de que en ocasiones la vegetación puede tener efectos negativos—como la generación de sobrecargas en zonas desfavorables para la estabilidad del terreno, la transmisión de efectos del viento a través de las copas y troncos, y la aparición de zonas de flujo preferencial en el suelo—, en general, el efecto neto de la vegetación es ampliamente positivo.

En este capítulo se analizan los efectos del refuerzo hidromecánico relacionados con el análisis de estabilidad de laderas vegetadas.

6.3.2 Efectos del desarrollo de la vegetación en las comprobaciones de estabilidad

a) Cohesión adicional debida a las raíces de las plantas

Existen distintos métodos para calcular el efecto de refuerzo hidromecánico de las raíces de las plantas. En función de la información disponible, se pueden utilizar métodos más complejos (Schwarz et al., 2010) e incluso considerar la compatibilización entre el nivel de deformación del suelo y el refuerzo desarrollado por las raíces (Tardío & Mickovski, 2015).

En este documento se va a utilizar un método de refuerzo de raíces muy extendido, debido a su simplicidad y fácil aplicación. El método que se expone a continuación traduce el efecto de refuerzo de las raíces en un valor de cohesión adicional que se añade a la cohesión propia del terreno sin vegetación. Se trata del “modelo de refuerzo de raíces perpendiculares e inclinadas” desarrollado por Wu et al. (1979) y Waldron (1977).

Los efectos positivos de la vegetación en la estabilidad de las laderas se deben tanto a la protección frente a procesos erosivos, como a la mejora de la propia estabilidad de los terrenos donde se desarrolla la vegetación

La constante 0,5 representa un factor de corrección que refleja la incertidumbre asociada a la distribución real del sistema radical y a la suposición de que todas las raíces alcanzan de forma simultánea su máxima resistencia a tracción. Este valor está ampliamente aceptado por los investigadores del sector

Siguiendo este método, la expresión para el cálculo de la cohesión adicional (Δc) es la siguiente (Bischetti et al., 2005):

$$\Delta c = 0.5 \cdot 1.1 \cdot t_R$$

Donde:

La constante 0,5 representa un factor de corrección que refleja la incertidumbre asociada a la distribución real del sistema radical y a la suposición de que todas las raíces alcanzan de forma simultánea su máxima resistencia a tracción. Este valor está ampliamente aceptado por los investigadores del sector.

La constante 1,1 refleja las características medias de anchura de la banda de cortante y del ángulo de intersección de las raíces y la banda cortante; así como, valores medios del ángulo de fricción interna.

t_R : resistencia a tracción media de las raíces por unidad de superficie de suelo (kPa).

$$t_R = \sum_{i=1}^{i=n} T_{Ri} RAR_i(z) = T_R \cdot RAR(z)$$

Donde:

n: número de clases diamétricas de las raíces.

T_{Ri} : resistencia a tracción de las raíces de la clase diamétrica i (kPa).

T_R : resistencia media a tracción a la profundidad z (kPa).

$RAR(z)$: índice Root Area Ratio que expresa la relación entre la suma de secciones transversales de las raíces (m^2) y la superficie de suelo explorado por las raíces (m^2) a la profundidad z (m).

$$RAR(z) = \frac{Ar(z)}{Ars(z)}$$

Donde:

$Ar(z)$ = suma de las secciones transversales de las raíces (m^2) a la profundidad z (m).

$Ars(z)$ = área explorada por las raíces (m^2) a la profundidad z (m).

Todos los anteriores parámetros se pueden obtener mediante trabajos de campo y laboratorio que permitan la caracterización del sistema radical (Böhm, 1979).

En caso de no disponer de datos, se puede realizar un cálculo aproximado a partir de la resistencia media a tracción de las raíces (obtenida de bibliografía).

La variación de la suma de las secciones transversales de las raíces con la profundidad se puede calcular a partir de modelos teóricos como el que se muestra a continuación (Laio et al., 2006; Preti et al., 2010; Tron et al., 2014):

$$Ar(z) = Ar_0 e^{\frac{-z}{b_m}}$$

Donde:

Ar_0 : sección transversal (m^2) a la altura del cuello de la raíz (a $z=0$).

b_m : profundidad media de las raíces (m). Se puede adoptar un valor del 25 % respecto a la profundidad máxima de las raíces. Esta, a su vez, se puede obtener en campo o en la bibliografía recomendada (Coder, 2014; Bischetti et al., 2005). Se escoge un 25 % por ser la ordenada del centro de masas de una distribución de las raíces de tipo cono invertido.

El único dato por obtener, en campo o en viveros, es el área del suelo explorada por las raíces en las zonas cercanas a la superficie. A partir de este dato, y utilizando la profundidad máxima del sistema radical, se puede interpolar la variación del suelo explorado de forma lineal. Con este último dato se puede conocer, a cualquier profundidad, el valor de RAR y utilizarlo en el método de refuerzo de raíces. En el caso de no disponer de datos sobre la evolución de la vegetación empleada, se podrá hacer este cálculo a la profundidad de 0,5 m (escenario crítico).

Otra opción, totalmente teórica, consistiría en estimar el área explorada por las raíces en la zona cercana a la superficie a partir del volumen radical (que puede ser inferido, a su vez, a partir del volumen de la biomasa aérea y las relaciones alométricas de la especie), la profundidad máxima del sistema radical (obtenida de bibliografía) y bajo la hipótesis de una distribución cónica de la misma (Tardío et al., 2016). En este caso, siendo R el radio de la superficie circular del suelo explorada en la zona cercana a la superficie, las anteriores variables estarían relacionadas a través de la siguiente expresión:

$$R = \sqrt{\frac{3 \cdot V}{\pi \cdot h}} \quad (\text{Tardío et al., 2016})$$

Donde:

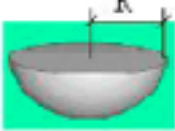
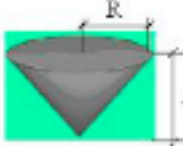
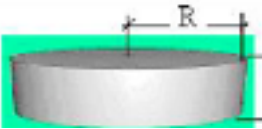
V: volumen del sistema radical (m^3).

h: profundidad máxima del sistema radical (m).

Como se puede observar, se trata de problemas en los que, a partir de las variables conocidas, se puede inferir el valor de la variable incógnita.

A partir de R se obtendría el valor del círculo de superficie explorada por las raíces en la zona cercana a la superficie la cual permitiría obtener el RAR a $z=0$ metros y, a partir de él, el valor del RAR a cualquier profundidad (bajo la hipótesis de distribución cónica del sistema radical o a partir de la tipología del sistema radical; ver tabla en página siguiente).

El único dato por obtener, en campo o en viveros, es el área del suelo explorada por las raíces en las zonas cercanas a la superficie. A partir de este dato, y utilizando la profundidad máxima del sistema radical, se puede interpolar la variación del suelo explorado de forma lineal

Tipo de sistema radical	Morfología	Geometría simplificada	Ars(z)
Esférico			$4 \cdot (R^2 - z^2)$
Pivotante (cónico)			$4 \cdot (R - z)^2$
Cilíndrico			$4 \cdot R^2$

La variación con la profundidad del área de suelo explorado por las raíces (Ars(z)) se puede estimar en función del tipo de sistema radical de la especie vegetal analizada.

El valor obtenido de cohesión adicional se utilizará en los distintos factores de comprobación de estabilidad. También se podrá utilizar en la reducción de la magnitud de los empujes activos del terreno.

b) Efectos sobre los empujes del terreno

El principal efecto del refuerzo de las raíces sobre el valor de los empujes de tierra se debe a la cohesión adicional generada por éstas. Esta cohesión puede reducir el valor neto de los empujes activos de tierra de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Pa = Ka \cdot \sigma_v - 2 \cdot c \cdot \sqrt{Ka}$$

Donde:

Pa: presión activa (kPa).

σ_v : tensión normal (kPa).

Ka: coeficiente de empuje activo.

c: cohesión adicional debida a las raíces (kPa).

Esta reducción de los empujes activos afectará solo al volumen de terreno explorado por las raíces. En el caso de incluir los efectos de esa misma cohesión en los empujes pasivos, se utilizará la siguiente expresión:

$$Pp = Kp \cdot \sigma_v + 2 \cdot c \cdot \sqrt{Kp}$$

Donde:

Kp: coeficiente de empuje pasivo.

Pp: presión pasiva (kPa).

En el caso de que el suelo tuviera un cierto valor de cohesión para el análisis a largo plazo (condiciones drenadas), éste se añadiría al aportado por las raíces.

6.4 METODOLOGÍA DE CÁLCULO Y JUSTIFICACIÓN DE LAS SOLUCIONES

6.4.1 Introducción

El cálculo y comprobación de una obra de bioingeniería ha de tener en cuenta tanto las particularidades de este tipo de intervenciones como la evolución del comportamiento mecánico de este tipo de estructuras vivas.

Esta situación se puede articular y organizar a través de las fases de la vida de servicio de este tipo de intervenciones de acuerdo con el esquema de FASES explicado en el epígrafe 3.2.2. En una primera fase (FASE 1), los materiales inertes (naturales o manufacturados) aportan la rigidez inicial necesaria para estabilizar la zona de intervención mientras que la vegetación no cumple ningún (o casi ningún) papel de refuerzo hidromecánico.

En una segunda etapa (FASE 2), la vegetación ya ha alcanzado un cierto nivel de desarrollo, pero todavía no es capaz de estabilizar la zona de intervención por sí misma sin el apoyo de los materiales inertes. Estos, a su vez, ya comienzan a sufrir el efecto de los procesos de deterioro lo cual afecta a su rendimiento mecánico.

Por último, existe una tercera etapa (FASE 3) donde la vegetación es capaz de cumplir por sí misma todas (o casi todas) las funciones de estabilización y refuerzo de la zona de intervención. Los materiales inertes apenas cumplen ya funciones de estabilización (o, en cualquier caso, ya no son necesarios). Estos materiales sirven ahora como abono de liberación lenta para la comunidad vegetal existente.

Se observa cómo, en el enfoque de la obra de bioingeniería, los conceptos de economía circular y rehabilitación ecológica están íntimamente entrelazados.

Por tanto, durante la primera fase (FASE 1) de una obra de bioingeniería, el principal objetivo es asegurar la rigidez necesaria que permita el proceso de trasvase del papel estabilizador entre los materiales inertes y el material vivo. De esta manera se da viabilidad a la segunda y tercera etapa de la vida de servicio de la obra. En la FASE 1, hay que calcular y justificar la obra de la misma manera que en el caso de una obra de ingeniería tradicional. También hay que incorporar los efectos de los procesos de deterioro de los materiales biodegradables en las comprobaciones de estabilidad a medio y largo plazo.

Las anteriores particularidades han de tenerse en cuenta en las comprobaciones de las distintas técnicas de bioingeniería propuestas.

6.4.2 Mecanismos de refuerzo de las técnicas

En general, existen dos tipos de mecanismos de refuerzo de las laderas:

1. **Elementos de refuerzo externos:** Representadas por elementos de contención tales como muros, entramados, escolleras, gaviones, etc. En este caso,

Se observa cómo, en el enfoque de la obra de Bioingeniería del Paisaje, los conceptos de economía circular y rehabilitación ecológica están íntimamente entrelazados

El principal efecto del refuerzo de las raíces sobre el valor de los empujes de tierra se debe a la cohesión adicional generada por éstas

las fuerzas estabilizantes se movilizan sobre una estructura externa. La teoría y metodologías de comprobación de la estabilidad de la obra son las que tradicionalmente se utilizan para los muros de contención, los muros jaula y las estructuras de madera (Gray & Sotir, 1996). En la Fase I de la vida de servicio de la obra el refuerzo se debe a las propiedades y configuración de los materiales empleados.

2. Elementos de refuerzo internos: Representados por los distintos tipos de tierra reforzada tales como geotextiles, geomallas, telas metálicas, etc. Se caracteriza porque los elementos de refuerzo se instalan dentro del propio terreno y se extienden más allá de la zona inestable del suelo (atravesan la superficie de deslizamiento crítica). En este caso las metodologías de comprobación que se utilizan es la teoría de diseño y cálculo de tierras mecánicamente estabilizadas. En la Fase I de la vida de servicio de la obra el refuerzo se debe a las propiedades y configuración de los materiales empleados.

La incorporación de los distintos mecanismos de refuerzo en el dimensionado y comprobación de una obra de bioingeniería se indican en el epígrafe 3.2 —El enfoque y la estrategia en la obra de bioingeniería. Fases de la vida de servicio de la obra de bioingeniería—. En dicha sección se muestra tanto el tipo de refuerzo como la fase de la vida de servicio.

Aparte de los anteriores procesos, en la obra de bioingeniería, podemos contar con otro mecanismo de refuerzo relacionado con el material vivo utilizado. Este consiste en el refuerzo hidromecánico debido a la presencia de raíces en el suelo. La manera de calcular e incorporar este efecto en las comprobaciones de estabilidad en el largo plazo viene explicado en el epígrafe 6.3: *Estabilidad de las laderas vegetadas: papel de la vegetación en la estabilidad*.

6.4.3 Las comprobaciones de estabilidad de las obras de bioingeniería

Generalmente, la comprobación de las estructuras de contención y/o estabilización de laderas incluyen los siguientes aspectos:

- **Comprobación de la estabilidad externa:** ésta generalmente incluye las comprobaciones de estabilidad a deslizamiento, vuelco y capacidad portante del terreno. Es decir, se analizan las distintas posibilidades de falla externa. La formulación y enfoque a utilizar se define en el epígrafe de cálculo de cada técnica.
- **Comprobación de estabilidad global:** esta comprobación se suele incluir dentro del anterior grupo y consiste en el análisis de la estabilidad del conjunto ladera y técnica. Se realiza un análisis de estabilidad que incluya los efectos de refuerzo de la técnica empleada. Las comprobaciones a realizar vienen definidas en el epígrafe correspondiente al cálculo de cada técnica.
- **Comprobación de estabilidad interna:** consiste en la comprobación de las secciones y resistencia de los materiales empleados. Es decir, se analizan los posibles casos de falla interna de la estructura.

En esta comprobación obtenemos los diámetros mínimos de los elementos de madera, la resistencia necesaria de las uniones entre los distintos elementos, el peso mínimo de las rocas de una escollera, la longitud de anclaje de un geotextil o geomalla, realizamos la comprobación a cortante de las jaulas de un entramado de madera, etc. En estas comprobaciones han de tenerse en cuenta

los procesos de deterioro de los materiales utilizados. Las comprobaciones a realizar vienen definidas en el epígrafe correspondiente al cálculo de cada técnica.

Las anteriores comprobaciones han de combinarse con un marco temporal que permita el desarrollo completo de los mecanismos de refuerzo de la obra. Así, tendremos comprobaciones a corto y a largo plazo combinadas con las fases de la vida de servicio de la obra.

Por otro lado, en el corto plazo, las comprobaciones relacionadas con el análisis de estabilidad y la utilización de los parámetros resistentes del terreno se realizarán tanto en condiciones no drenadas como drenadas.

En cualquier caso, las comprobaciones se adaptarán al tipo de técnica que se esté proponiendo. Así, por ejemplo, si utilizamos una escollera vegetada, un gavión vegetado, un entramado de madera (simple o doble), un enrejado o una empalizada vivos de madera, tendremos que definir y dimensionar las obras y los elementos utilizados de forma que las comprobaciones de estabilidad se cumplan en todo momento durante un periodo de tiempo que permita que la vegetación se desarrolle.

Es decir, las comprobaciones de la FASE 1 han de asegurar el desarrollo adecuado y eficiente de la vegetación durante las FASES 2 y 3. Una vez conseguido este objetivo, los materiales pueden seguir deteriorándose y desapareciendo poco a poco ahora que la vegetación es la principal Fuente: de refuerzo del terreno.

6.5 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LAS TÉCNICAS

A la hora de elegir las técnicas, y en base al análisis realizado y descrito en el apartado 5.1, se podrá establecer cuál es la situación de nuestra ladera y seleccionar las técnicas siguiendo el principio: realizar todo lo necesario pero lo menos posible.

En la fase de proyecto el principio de las intervenciones en bioingeniería es el de adoptar siempre la tecnología menos compleja a igual resultado, considerando siempre la hipótesis de no intervención. Se entiende por solución menos compleja la que requiera menor nivel de energía, esto es menor complejidad, más sostenible.

Además, siempre se debe considerar la opción cero o de no intervención; así como, considerar la existencia de límites a partir de los cuales se deben utilizar las técnicas de ingeniería tradicionales. No pueden admitirse obras sobredimensionadas o excesivamente complejas con relación al problema a resolver.

De esta manera, nos debemos interrogar acerca de las condiciones concretas de nuestra obra, que en el caso concreto del talud hacen referencia a:

- La presencia o ausencia de agua en el talud, que en función de su profundidad puede resolverse con drenajes superficiales con materiales tradicionales combinados con drenajes biotécnicos, o requerir drenajes técnicos más profundos.
- El peligro de erosión: si es superficial puede resolverse mediante técnicas de recubrimiento como las siembras o si requieren de un aporte de materia orgánica, empleando entonces hidromantas o hidrosiembras enriquecidas.

A la hora de elegir las técnicas, y en base al análisis realizado y descrito en el apartado 5.1, se podrá establecer cuál es la situación de nuestra ladera y seleccionar las técnicas siguiendo el principio: realizar todo lo necesario pero lo menos posible

Los elementos de refuerzo internos están representados por los distintos tipos de tierra reforzada tales como geotextiles, geomallas, telas metálicas, etc. Se caracterizan porque se instalan dentro del propio terreno y se extienden más allá de la zona inestable del suelo (atravesan la superficie de deslizamiento crítica)

En la fase de proyecto el principio de las intervenciones en bioingeniería es el de adoptar siempre la tecnología menos compleja a igual resultado, considerando siempre la hipótesis de no intervención

- Si la erosión es más profunda, nos debemos interrogar si esta erosión está siempre dentro de la esfera de enraizamiento de las plantas, o fuera de ella y, por tanto, en el límite del empleo de la bioingeniería del paisaje.

En el caso de que la erosión afecte a la esfera de enraizamiento de las plantas, existen dos posibilidades:

a) Las intervenciones utilizando exclusivamente plantas, como el estaquillado, las fajinas y los lechos de ramaje, son suficientes y adecuadas para gestionar el terreno en función de la pendiente.

b) Si se requieren técnicas mixtas de bioingeniería. Es importante plantearse las siguientes cuestiones:

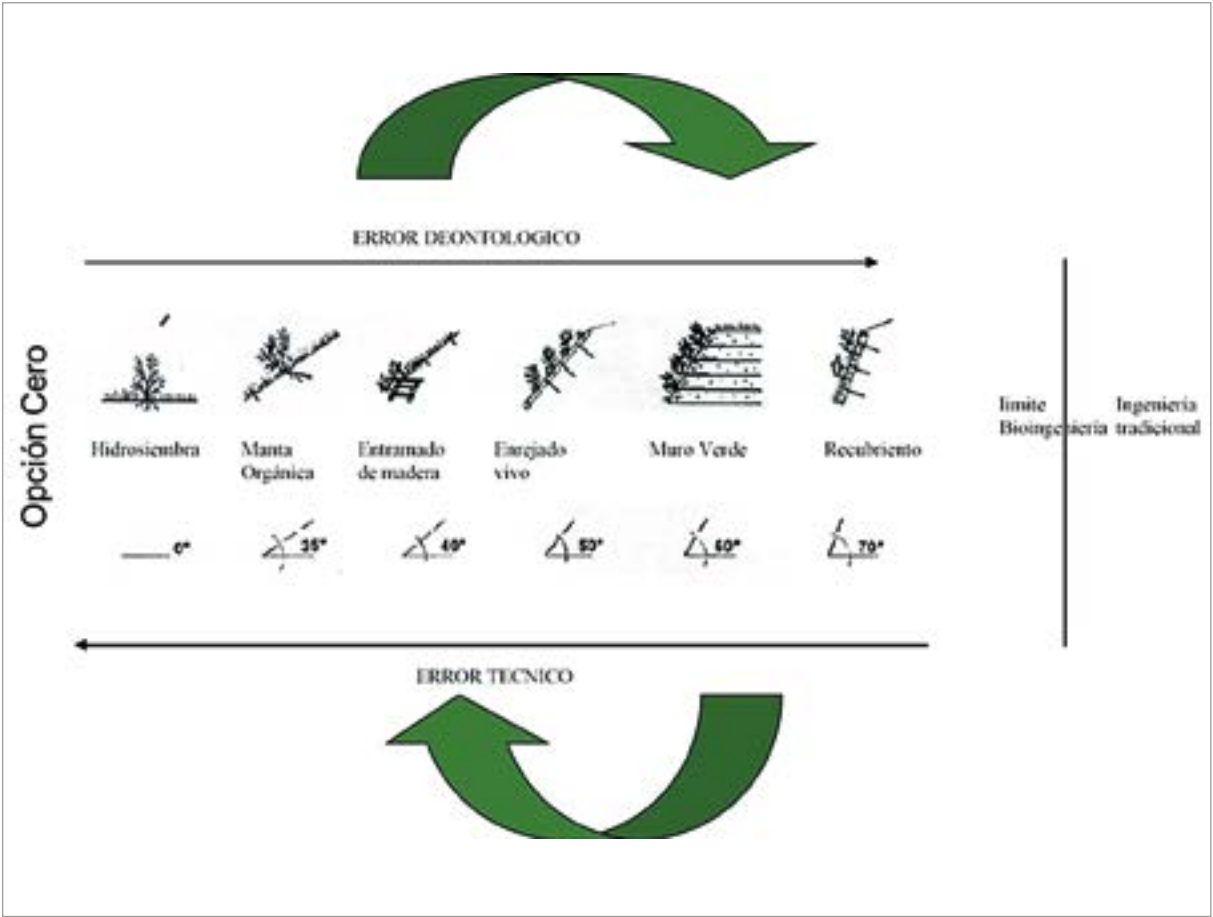
• ¿Es suficiente la consolidación al pie y es suficiente una estructura temporal? En este caso, se recomiendan los entramados.

• ¿Es suficiente la consolidación al pie, pero requiere una estructura permanente? En este caso, se sugiere una escollera vegetada.

• Si se requiere una recuperación completa de la ladera, se recomienda el uso de enrejados.

En la página siguiente, se establece una matriz de selección de las distintas técnicas en base a lo indicado.

Imagen 85. Código deontológico de la bioingeniería del Paisaje. Fuente: G. Sauli



Utilización		Tipologías constructivas	Protección erosión superficial		Función de mejora ecológica	Función de mejora técnica	Inicio eficacia	Duración de la eficacia	Eficacia espacial	Coste económico	Pendiente máxima	
			Estabilización profundidad < 1 m	Estabilización profundidad > 1 m								
Protección superficial	Siembra a voleo	3	1		1	2	2	2	3	1	30°	
	Hidrosiembra	3	1		1	2	1	2	3	1	35°	
	Hidrosiembra enriquecida	3	1		1	2	1	2	3	2	35°	
	Hidromanta	3	1		2	2	1	2	3	2	38°	
Drenaje de laderas	Fajinas de drenaje	1	2		3	2	2	3	2	1	40°	
	Bajantes escalonadas	1	2		1	3	1	3	2	2	45°	
	Cunetas	1	2			3	1	3	2	1	45°	
Estabilización talud/Profundidad	< 100 cm	Estaquillado	2	3	2	3	2	2	3	1	1	38°
		Fajina de ladera	2	3		3	2	2	3	2	2	40°
		Lechos de ramaje, plantas y mixtos		3	2	2	2	2	3	2	2	40°
		Empalizadas		3	2	2	2	1	3	2	2	45°
		Entramado simple		3	3	2	2	1	3	2	3	45°
	100 – 250cm	Entramado doble o Kreiner	3		3	2	3	1	3	2	3	55°
		Entramado loricata	3		3	2	3	2	3	2	3	60°
		Entramado Latina	3		3	2	3	1	3	2	3	55°
		Entramado Águila	3		3	2	3	1	3	2	3	55°
		Enrejado vivo	3	3		2	2	2	3	3	3	65°
		Escollera vegetada	3		3	1	2	1	3	2	3	65°

Imagen 86. Directrices de Bioingeniería del Paisaje EFIB (Hacker et al. 2015), modificado de P. Sangalli y G. Tardío

LEYENDA			
Grado de eficacia técnica	1 = bajo	2 = medio	3 = elevado
Inicio de la eficacia	1 = inmediato	2 = tras diversas semanas	3 = tras diversos meses
Duración de la eficacia	1 = a corto plazo (1-5 años)	2 = medio plazo (5-10 años)	3 = largo plazo (más de 10 años)
Efectividad espacial	1 = puntual	2 = lineal	3 = área
Coste	1 = bajo	2 = medio	3 = alto



7. PRINCIPALES TÉCNICAS



7.1 TÉCNICAS DE RECUBRIMIENTO

SIEMBRAS POR PROYECCIÓN HÍDRICA



Imagen 87. Hidrosembradora proyectando una hidromanta. Fuente: P. Sangalli-SCIA S.L.

7.1.1 Definición y alcance

Las siembras por proyección hídrica son técnicas de recubrimiento consistentes en proyectar una mezcla de semillas, agua y otros elementos que tienen por finalidad la revegetación del suelo y el control de la erosión superficial de un talud o ladera.

Se distinguen tres tipos de hidrosiembras, en función de la densidad y características de sus componentes:

- **Hidrosiembra tradicional:** consiste en una siembra por proyección hídrica de una mezcla de agua, semillas, coberturas protectoras, aglutinantes, fertilizantes y aditivos que favorece la adhesión de las semillas al terreno, su germinación y la formación de una cubierta vegetal en superficies expuestas a la erosión.
- **Hidrosiembra enriquecida:** es una hidrosiembra de alta densidad. Es una variante de la hidrosiembra tradicional que incorpora a la mezcla habitual un sustrato triturado muy fino en varias pasadas.
- **Hidromanta:** tipo de hidrosiembra con una cobertura protectora específica que se incorpora de forma complementaria al aglutinante y forma un recubrimiento continuo en el suelo. Es una técnica permeable y con una persistencia mayor en el tiempo que la de una hidrosiembra tradicional, que favorece la germinación de las semillas y la protección superficial en terrenos expuestos a la erosión.

Las hidromantas también presentan una densidad más alta con una mayor proporción de cobertura protectora específica que permite un recubrimiento continuo muy parecido al de la técnica de las mantas orgánicas, sin que ello perjudique la viabilidad de las semillas. No obstante, para asegurar dicha viabilidad se evitará la utilización de productos de cobertura protectora que puedan crear costras en el terreno o dificulten la germinación y el desarrollo de las plántulas.

Las principales ventajas de las siembras por proyección hídrica son:

Técnica adecuada para realizar un trabajo rápido y eficaz, sobre todo para el tratamiento de grandes superficies de suelos pobres o terraplenados inaccesibles y que no pueden sembrarse con los medios habituales. Asimismo, contribuye a conseguir una protección superficial del talud prácticamente inmediata, evitando la aparición de cárcavas y surcos de erosión y, por tanto, evitando la pérdida de suelo.

7.1.1.1 Aplicaciones

Las siembras de proyección hídrica son técnicas de bioingeniería del paisaje de recubrimiento o de control de erosión superficial que permiten una protección rápida de la superficie del suelo. Esta técnica se emplea con efectividad en los siguientes casos:

- Para controlar la erosión superficial.
- Para revegetar zonas con escasa tierra vegetal o zonas de difícil acceso.
- Para revegetar taludes de hasta 40° de pendiente en taludes de suelos y de hasta 50° en suelos poco desarrollados o regolitos algo meteorizados.
- Para complementar la revegetación en áreas estabilizadas con otras técnicas de bioingeniería.
- Para zonas en las que se necesite una mejora de la estabilidad de un talud a poca profundidad.

De manera particular:

- Las hidrosiembras enriquecidas se emplean especialmente en zonas de escasa tierra vegetal.
- Las hidromantas se emplean en aquellos taludes donde hay necesidad de una ulterior protección del talud.

7.1.2 Materiales

En los siguientes apartados se describen los materiales comunes a utilizar para realizar todos los tipos de siembras de proyección hídrica.

7.1.2.1 Agua

Dosis comprendida entre 2-5 litros/m² en función de la pendiente y la orientación, superior cuanto mayor sea la pendiente y la orientación sur frente a la orientación norte.

Se admiten todas las aguas aptas para uso agrícola y aguas clasificadas potables.

Las características son:

- pH comprendido entre 6 y 8.
- Oxígeno disuelto superior a 3 mg/l.
- Contenido en sales solubles inferior a 2 g/l.
- Contenido en sulfatos (SO₄) menor de 0,9 g/l, en cloruro (Cl) menor de 0,29 g/l y en boro menor de 2 mg/l.
- No debe contener bicarbonato ferroso, ácido sulfhídrico, plomo, selenio, arsénico, cromatos o cianuros.

7.1.2.2 Semillas

La mezcla de semillas debe ser diseñada para cada caso, de acuerdo con el análisis de la vegetación autóctona y local de la zona.

Especies herbáceas

Si bien, en determinados casos, se incorporan también determinadas especies leñosas de árboles y arbustos, las herbáceas constituyen la mayor parte de las semillas de la mezcla. Por lo general, se trata de una mezcla de semillas de gramíneas y leguminosas.

Las gramíneas son las especies prevalentes dentro de las praderas naturales como especies de gran recubrimiento y se adaptan a una gran amplitud de condiciones edafoclimáticas. Además, las gramíneas tienen una gran capacidad para cohesionar el suelo.

Se recomienda incluir especies que presenten una buena dispersión lateral mediante rizomas o estolones.

Las leguminosas son plantas con un sistema radical profundo que viven en simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno, lo que permite enriquecer el suelo. Dado que las leguminosas son plantas con mayor capacidad vegetativa que las gramíneas, el porcentaje de semillas de leguminosas no debería superar el 30 % en peso del total de la mezcla de semillas.

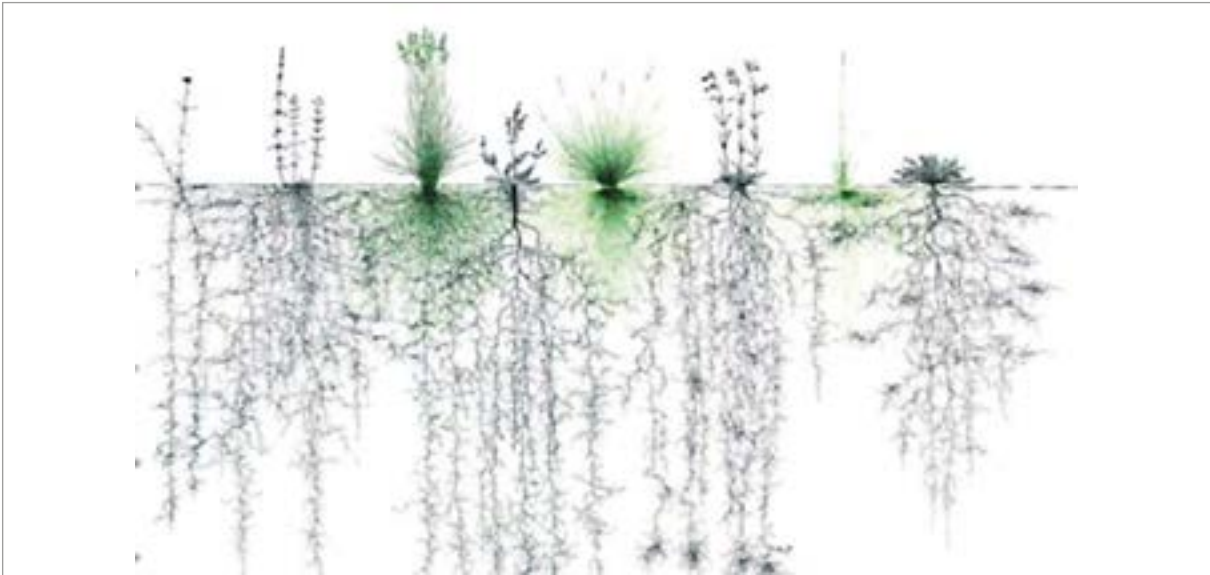


Imagen 88. Integración de especies en una pradera con los distintos aparatos radicales: en verde gramíneas y en negro leguminosas. Fuente: Bautipenbuch EFIB

Se tendrán en cuenta la tipología, los períodos de latencia y los tratamientos pregerminativos de las semillas. Se recomienda utilizar especies sin latencia o, como mucho, con una latencia ligera. Las semillas no podrán estar germinadas.

Tal y como se recoge en el artículo dedicado a las hidrosiembras del P.P.T.P. del Departamento de Infraestructuras y Desarrollo Territorial de la D.F.B. (Herrilan), la mezcla de semillas utilizada en Bizkaia para dicha técnica deberá estar constituida por unas especies básicas en un 85 % en peso de la mezcla, estando el 15 % restante supeditado a los problemas concretos de la estación en la que se realice la actuación. Asimismo, se limita el porcentaje máximo en peso que cada una de las especies pueda representar en la mezcla final. Estos máximos marcados para cada especie no podrán ser sobrepasados, asegurando así una mayor biodiversidad que no se limite a tres o cuatro especies exclusivamente.

Tabla 9. Porcentaje máximo en peso de especies de herbáceas empleadas en hidrosiembra. Fuente: Herrilan (modificado)

Especie	Tipo	Porcentaje máximo en peso
	Gramínea	25
<i>Festuca arundinacea</i>	Gramínea	15
<i>Festuca rubra</i>	Gramínea	15
<i>Poa pratensis</i>	Gramínea	10
<i>Dactylis glomerata</i>	Gramínea	5
<i>Trifolium pratense</i>	Leguminosa	15
<i>Trifolium repens</i>	Leguminosa	5
<i>Lotus corniculatus</i>	Leguminosa	5
<i>Vicia sativa</i>	Leguminosa	5

Las hidrosiembras con solo especies herbáceas son las que en el Herrilan corresponden a las de Tipo H1.

Especies leñosas (árboles y arbustos)

Dado el tamaño de las semillas de leñosas, por lo general, tan solo se podrán incorporar a la mezcla aquellas semillas de pequeño tamaño. Las semillas de plantas arbustivas y plantas arbóreas tendrán una procedencia ecológica similar a la zona a implantar y serán autóctonas.

De cara a la composición de la mezcla se distinguen las siguientes litologías:

- Desmontes en rocas poco degradables: En el Territorio Histórico de Bizkaia se incluyen litologías tales como calizas, calizas margosas, margocalizas, dolomías, areniscas, coladas volcánicas masivas.
- Desmontes en rocas degradables: en el Territorio Histórico de Bizkaia se incluyen litologías tales como margas, lutitas, lutitas calcáreas, alternancias de tipo flysch, areniscas poco cementadas, ofitas, rocas piroclásticas. También se incluyen zonas tectonizadas, independientemente de la litología.
- Terraplenes o desmontes de roca muy degradables: en este grupo se incluyen litologías como lutitas poco cementadas, arenas, arcillas y yesos del Kreuper, rocas detríticas poco cementadas, etc. Se incluyen zonas fuertemente tectonizadas independientemente de la litología.

A continuación, se indican las especies leñosas y su proporción en peso que se pueden incluir en las siembras de proyección hídrica en el Territorio Histórico de Bizkaia, en función del tipo de litología de la superficie a tratar.

Tabla 10. Porcentaje en peso y composición de las especies leñosas a incluir en las siembras de proyección hídrica en función del tipo de litología. Fuente: Herrilan (modificado)

Especie	Desmorte poco degradable	Desmorte Degradable	Terraplén/ Desmorte muy degradable
	0,4 g/m²	0,4g/m²	1,0 g/m²
<i>Brachypodium pinnatum</i>	40 %	20 %	2 %
<i>Erica Vagans</i>	10 %	5 %	0,2 %
<i>Genista hispanica</i>	47 %	25 %	2 %
<i>Sedum album</i>	3 %	1 %	0,1 %
<i>Rosa sempervirens</i>	-	10 %	4 %
<i>Rhanmus alaternus</i>	-	5 %	1,5 %
<i>Ulex europeus</i>	-	6 %	2 %
<i>Calluna vulgaris</i>	-	1 %	1 %
<i>Erica cinerea</i>	-	0,5 %	0,1 %
<i>Salix atrocinerea</i>	-	0,5 %	0,1 %
<i>Citissus scoparisu</i>	-	6 %	1 %
<i>Arbutus unedo</i>	-	15 %	5 %
<i>Rubus ulmifolius</i>	-	5 %	1 %
<i>Crataegus monogyna</i>	-		20 %
<i>Cornus sanguinea</i>	-		15 %
<i>Prunus spinosa</i>	-	-	45 %

En aquellas zonas donde hay muy poca posibilidad de una introducción natural de semillas de plantas arbustivas y arbóreas cabe considerar, de acuerdo con las posibilidades de cada zona, la técnica de siembra directa o plantación de especies arbustivas y arbóreas autóctonas en ruedos dentro de la zona hidrosemada.

Las hidrosiembras que incorporan junto con las especies herbáceas también las leñosas corresponde la hidrosiembra Tipo H2. La proporción será del 95 % en peso de herbáceas y el 5 % de leñosas.

La dosis de siembra orientativa de la mezcla de semillas se sitúa entre 30 g/m² y 50 g/m² y la cantidad recomendada a aplicar es de 2-5 semillas/cm². La cantidad y la tipología de las semillas de la mezcla a utilizar están en relación con la naturaleza del suelo y con su preparación, altitud, exposición, pendiente del terreno, así como con la época y el método de siembra por proyección hídrica.

En cada biotopo las especies hidrosembradas evolucionan con el tiempo hacia un prado natural debido a la llegada de semillas de las plantas silvestres próximas. La cobertura protectora es idónea para formar un microclima que favorezca el desarrollo de la vegetación y proteja la superficie del suelo de los agentes externos (lluvias fuertes, granizo, viento) y la erosión. Así mismo, puede almacenar agua y entregarla lentamente. Nunca podrá contener elementos tóxicos o lixiviables que afecten a la germinación y posterior desarrollo de las plantas.

7.1.2.3 Coberturas protectoras o mulch

Las cubiertas protectoras son elementos que, tal y como su nombre indica, sirven para proteger el suelo. Por lo general, son de origen orgánico y al descomponerse incorporan nutrientes al terreno. Además, estos materiales tienden a aumentar la absorción de agua al reducir las pérdidas por evaporación, mantienen uniforme la temperatura del suelo y contribuyen a disminuir la erosión provocada por el impacto sobre el terreno de la gota de lluvia.

De acuerdo con la Norma NTJ08H, las tipologías de coberturas protectoras que se pueden utilizar en las siembras por proyección hídrica son:

- **Procedentes de actividades agrícolas:** heno picado, paja de cereal, fibras de madera, triturado de soja, cáscaras de arroz o trigo, subproductos de caña de azúcar.
- **Procedentes de actividades forestales:** celulosa, corteza de árboles, acículas de pino, turba, restos de poda triturados, papel, serraduras de madera, lana.

Hidromanta

En el caso concreto de las hidromantas, la cubierta protectora es el elemento que las caracteriza. En las hidromantas, las cubiertas protectoras están constituidas por un polímero polisacárido como aglomerante procedente de polímeros de moléculas de cadena larga que se enlazan en cruz. Esta unión hace que se mezcle y fluya fácilmente cuando está mojado, y le permite permanecer duro e insoluble una vez seco protegiendo la superficie del suelo contra las lluvias y la erosión.

Está compuesto por fibras de madera residuales de alta calidad, refinadas termo-mecánicamente. Este proceso da lugar a un material limpio y altamente fibroso, consiguiendo una matriz entrelazada de muchísima calidad. Se mezcla mediante agitación mecánica en un tanque de hidrosembradora. El producto se mezcla rápida y fácilmente, permitiendo una gran adaptabilidad a la morfología del talud y protegiendo, incluso, taludes de gran inclinación y difícil acceso. En un plazo de 24 horas forma una matriz duradera, de color natural y resistente al agua.

Dependiendo de la topografía y de la técnica de aplicación, se seca con un grosor de entre 3 mm y 6 mm. Esta matriz se une íntimamente al suelo y se adapta a sus contornos, asegurando una protección completa. Puede establecerse para proteger una nueva siembra, incluso cuando se ha aplicado con temperaturas cercanas al punto de congelación.



Imagen 89. Aplicación de hidromanta y tras la ejecución. Fuente: A. Sorolla

Con respecto a una hidrosiembra tradicional, la hidromanta consigue una menor escorrentía (hasta 65 % menos), tasas más altas de germinación y menor pérdida de semillas, y una duración en el talud de hasta 12-18 meses que permite la protección de esta hasta que se dan las condiciones óptimas de germinación.

7.1.2.4 Aglutinantes o agentes fijadores

Los fijadores son productos de origen orgánico que, aplicados en la hidrosiembra, permiten la formación de una película homogénea, elástica y permeable sobre el terreno. Los fijadores son compuestos formados por polibutadienos, alginatos, derivados de celulosa, derivados de almidón, acetato de vinilo, polímeros sintéticos de base acrílica, propionato de polivinilo y otros.

En el actual Herrilan se clasifican las hidrosiembras en función del agente fijador empleado. Así, distinguen:

- Hidrosiembras con Polibutadienos.
- Hidrosiembras con Curasol.

Los fijadores deben cumplir las condiciones siguientes:

- Dada la cantidad de fijadores existente en el mercado, a la hora de aplicarlos, se debe tener en cuenta las cantidades y modalidades específicas para cada tipo de elemento.
- Deben formar una capa superficial que resista a la erosión, preferiblemente, con un espesor similar al que pudiera ser afectado por esta.
- Deben ser biodegradables, no tóxicos, incombustibles y resistentes a las heladas.
- Deben favorecer y ser compatibles con otros productos que puedan reforzar su efecto.
- Deben permitir la circulación del aire y el mantenimiento de la humedad del suelo mejorando su estructura.
- No deben alterar los procesos biológicos del suelo.

7.1.2.5 Abonos o fertilizantes

En todos los tipos de siembras por proyección se requiere el empleo de fertilizantes, bien de origen orgánico bien de origen mineral, con los contenidos garantizados y de descomposición lenta y gradual de nitrógeno (abonos de liberación controlada), pudiéndose combinar con ácidos húmicos.

7.1.2.6 Aditivos (generalmente opcionales)

- **Coadyuvantes biológicos:** cuando las zonas a hidrosemar tengan al descubierto los horizontes inferiores del suelo, se puede potenciar la flora y la fauna microbiana autóctona mediante la utilización de coadyuvantes de tipo biológico. Entre los más habituales, se encuentran los inóculos de Rhizobium para las leguminosas y los productos hormonales que activan la germinación.

- Materiales naturales inertes (tierras o sustratos): es el aditivo que constituye la hidrosiembra enriquecida. Los materiales naturales inertes que se pueden incorporar en las siembras por proyección hídrica en obras de bioingeniería del paisaje son tierras limosas y arcillosa que se proyectan junto la hidrosiembra. En algunos casos también se proyectan sustratos como turba.

- Otros aditivos: cabe la posibilidad de incluir otros materiales aditivos a la mezcla a hidrosementar. Algunos de ellos son:

- Colorantes
- Superabsorbentes
- Fungicidas preventivos
- Algas cianofíceas
- Repelentes de microfauna o avifauna
- Geles

7.1.2.7 Maquinaria

La máquina para llevar a cabo las siembras por proyección hídrica es la hidrosementadora. La hidrosementadora está formada por:

- Un depósito de capacidades variables de entre 1.000 litros y 10.000 litros y, en casos especiales, de hasta 17.000 litros.
- Un motor.
- Una bomba de presión (tipo pistón, tornillo sin fin o centrífuga) de más de 35.000 l/h y de 5-10 atmósferas.
- Una torre de comando con un bypass en el exterior o en el interior del depósito.
- Un cañón de salida con posibilidad de conectar una manguera flexible. El sistema de proyección dispondrá de boquillas que permitan regular su alcance.

La hidrosementadora puede o no necesitar ser cargada sobre un vehículo (camión, tren, barco, etc.) o ser arrastrada encima de un remolque para llevar a cabo la ejecución de la proyección hídrica.

7.1.3 Ejecución de las obras

La época de realización de las hidrosiembras e hidromantas es durante la estación vegetativa que, en el Territorio Histórico de Bizkaia, es de finales de verano a otoño o de finales de invierno a primavera.

En la mayoría de los casos, las hidrosiembras se realizan en una fase, proyectando la mezcla en una sola proyección. En ocasiones, pueden hacerse en dos fases de composición diferente:

- Fase 1 de siembra: agua, mezcla de semillas, cobertura protectora, fertilizante y aditivos.
- Fase 2 de tapado: agua, cobertura protectora y aglutinante.

Las hidromantas y las hidrosiembras enriquecidas se realizan en dos fases con la misma composición en ambas: agua, mezcla de semillas, cobertura protectora especial, fertilizante y aditivos. La distribución se llevará a cabo en dos pasadas cruzadas. Las semillas se deberán distribuir lo más uniformemente posible. Durante esta operación, se deberá ir comprobando que la mezcla de semillas sea homogénea.

La semilla debe ponerse en contacto directo con la capa superficial del suelo y, si es posible, incorporarla a la profundidad que asegure, de acuerdo con su tamaño, su germinación correcta.

El proceso de ejecución sigue cronológicamente los siguientes pasos:

1. Llenado con agua del tanque de la hidrosementadora hasta cubrir la mitad de las paletas del agitador.
2. Incorporación del material de la cubierta protectora, con las paletas del agitador en movimiento y evitando la formación de grumos en la superficie del agua.

3. A continuación, se procede al llenado de agua hasta completar 3/4 partes de la capacidad total del tanque, manteniendo en movimiento las paletas del agitador.
4. Incorporación de las semillas, abonos y posibles aditivos.
5. Agitado de la mezcla durante diez minutos antes de empezar la hidrosiembra con el fin de favorecer la disolución de los abonos y estimular la facultad germinativa de las semillas.
6. Llenado del tanque con agua hasta los últimos 10 cm del tanque.
7. Incorporación del producto estabilizador de suelos. Antes de llevar a cabo la siembra, se debe conseguir una mezcla homogénea de todos sus componentes.
8. Aceleración del movimiento de los agitadores para conseguir una mejor homogeneización de la mezcla uno o dos minutos antes del comienzo de la siembra.
9. Siembra a través del cañón de la hidrosementadora, bien directamente o bien con la ayuda de una o varias mangueras conectadas. La distancia entre la boca del cañón (o de la manguera) y la superficie a tratar debe ser función de la potencia de expulsión de la bomba, oscila entre los 20 y 70 metros.

7.1.4 Control de calidad

Se verificará la aptitud de las máquinas, equipos y herramientas, así como de los materiales.

- Se verificará que las características de la hidrosementadora (capacidad del depósito, presión y caudal de la bomba de presión), de las boquillas y de la maquinaria auxiliar se ajusten a las necesidades particulares.
- Verificar los materiales:
 - Mezcla de semillas a utilizar: se solicitarán las etiquetas de certificación y las etiquetas de composición (especies, variedades, porcentajes de la mezcla) impresas en los sacos y serán recuperadas a medida que se vayan utilizando.
 - Dimensiones y características de los materiales utilizados (coberturas protectoras, fijadores, abonos orgánicos, enmiendas, coadyuvantes biológicos y aditivos): las principales indicaciones impresas en los sacos (contenido en elementos nutritivos, forma de éstos, etc.) serán recopiladas después de ser utilizados. El contratista deberá abrir en presencia de la Dirección de la Obra los envases de dichos materiales, y suministrar al director de obra una cantidad de 100 g de cada material para su aprobación de “de visu”.
- Verificar la superficie ejecutada y las cantidades de material por m²: en cuanto a la realización de la hidrosiembra, la Dirección de Obra comprobará que las cantidades de materiales utilizadas sean las marcadas por el Pliego de Condiciones Particulares para cada m², y que los metros cuadrados realizados con una carga de hidrosementadora sean los apropiados para una correcta dosificación por m² de los materiales de la hidrosiembra.

Si en un período máximo de dos meses a partir de la realización de la hidrosiembra no se ha producido la germinación de las semillas en una zona tratada, quedará a juicio del director de la obra la exigencia de repetir la operación de hidrosiembra. Dicha repetición, en caso de efectuarse, correría a cargo del contratista.

7.1.5 Medición y abono

La medición se hará sobre metro cuadrado (m²) realmente ejecutado en obra, medido sobre talud.

El abono se efectuará aplicando la medición a los precios unitarios para las unidades anteriormente concretadas y recogidas en el Cuadro de Precios N°1.

7.1.6 Recomendaciones

- La proporción de los distintos componentes a emplear para la preparación de la mezcla varía en cada caso particular en función de las condiciones climáticas y litológicas de las laderas. Se debe realizar un estudio del medio físico que permita valorar tanto la mezcla de materiales como el espesor a conseguir.
- Para evitar la sedimentación de las semillas se recomienda asegurar el buen mantenimiento de la mezcla.
- En las mezclas, se debe evitar el abuso de especies herbáceas pioneras de rápida germinación y efecto inmediato, ya que pueden competir con las otras especies de la mezcla e inhibir su crecimiento.
- Son técnicas a emplear en grandes superficies y en zonas donde se pueda llegar con los medios mecánicos, en concreto con las hidrosembradora. No son adecuadas para pequeñas superficies.
- La capacidad de la hidrosembradora dependerá de la zona a revegetar, la superficie y el acceso al lugar de la siembra.
- Respetar de forma estricta la temporada de siembra.
- Controlar el potencial germinativo intacto de las semillas, desechando aquellas que lleven mucho tiempo almacenadas.
- La elección de hidrosiembra o hidromanta estará condicionada principalmente por el sustrato litológico y por el presupuesto disponible. En suelos desnudos o muy rocosos es preferible la hidromanta.

Recomendaciones específicas para la proyección sobre el talud:

- Se recomienda expulsar la mezcla de manera que el chorro no incida directamente en la superficie a sembrar para evitar que, durante la operación, se produzcan movimientos de finos en el talud. Se proyecta describiendo círculos o en zigzag para evitar que la mezcla proyectada escorra por el talud. La proyección debe hacerse empezando por la parte baja del talud e ir ganando altura hasta llegar a coronación de talud.
- Cuando las condiciones climatológicas sean desfavorables y dificulten la realización de las obras y la obtención de resultados satisfactorios, se suspenderán los trabajos, que sólo se reanudarán cuando las condiciones sean otra vez favorables, o cuando se hayan adoptado medidas y procedimientos alternativos o correctivos aprobados por la Dirección de Obra.
- En el caso de terraplenes cuya base no sea accesible debe recurrirse a poner mangueras de forma que otro operador pueda dirigir el chorro desde abajo.

7.1.7 Propuesta de precio descompuesto: hidrosiembra, hidrosiembra enriquecida e hidromanta

A continuación, se establecen los precios por m² de las distintas siembras de proyección hídrica.

Se han establecido para una superficie comprendida entre 500 m² y 2.000 m². No obstante, se estima que para superficies inferiores a 500 m², los precios unitarios se incrementan un 25 %, y que para superficies superiores a 2.000 m² los precios unitarios se reducen un 20 %.

m2 Hidrosiembra herbáceas y leñosas						
Formación de pradera por hidrosiembra en dos pasadas en zonas de clima Océánico subhúmedo, mediante una mezcla de especies herbáceas y leñosas, a razón de 35gr/m2 en cualquier clase de terreno y pendiente, con una superficie de 100 a 2000 m2, mediante hidrosiembra sobre camión, abonado, siembra y cubición empleando los materiales y proporciones indicados. Medida la superficie ejecutada.						
Código	Unidad	Descripción	Requerimiento	Precio unitario	Importe	
1	m3	Materiales				
		Agua	0,002	1,54 €	0,00 €	
		Abono (NPK 15-15-15) i Abono orgánico	0,035	0,74 €	0,03 €	
		Much catalítico	0,1	2,05 €	0,21 €	
		Estabilizante orgánico	0,02	4,23 €	0,08 €	
		Acidos húmicos	0,005	2,18 €	0,01 €	
		Semillas hidrosembradora herbáceas	0,033	5,22 €	0,17 €	
		Semillas hidrosembradora leñosas	0,002	63,31 €	0,13 €	
		Subtotal materiales:				0,52 €
		2	h	Equipo y maquinaria		0,010
Hidrosiembra 6.000 l sobre camión						0,55 €
3	h	Mano de obra				
		Capataz Jardiner	0,001	24,00 €	0,02 €	
		Oficial 1º Jardiner	0,005	22,07 €	0,11 €	
		Peón ordinario jardiner	0,012	18,00 €	0,22 €	
Subtotal mano de obra:				0,35 €		
4	%	Costes directos complementarios		0,02	0,00 €	0,02 €
		Costes directos complementarios				0,02 €
Coste de mantenimiento durante 10 años en los primeros 10 años			Costes directos (1+2+3+4)		1,54 €	

Imagen 90. Precio descompuesto de hidrosiembra

m2 Hidrosiembra enriquecida						
Formación de pradera por hidrosiembra enriquecida en dos pasadas en zonas de clima Océánico subhúmedo, mediante una mezcla de especies herbáceas y leñosas, a razón de 35gr/m2 en cualquier clase de terreno y pendiente, con una superficie de 500 a 2000 m2, mediante hidrosiembra sobre camión, abonado, siembra y cubición empleando los materiales y proporciones indicados. Medida la superficie ejecutada.						
Código	Unidad	Descripción	Requerimiento	Precio unitario	Importe	
1	m3	Materiales				
		Agua	0,002	1,54 €	0,00 €	
		Abono (NPK 15-15-15)	0,035	0,74 €	0,03 €	
		Much catalítico	0,1	2,05 €	0,21 €	
		Estabilizante orgánico	0,02	4,23 €	0,08 €	
		Acidos húmicos	0,005	2,18 €	0,01 €	
		Semillas hidrosembradora herbáceas	0,033	5,22 €	0,17 €	
		Semillas hidrosembradora leñosas	0,002	63,31 €	0,13 €	
		Tierra vegetal cribada	0,002	25,00 €	0,00 €	
		Subtotal materiales:				
2	h	Equipo y maquinaria		0,010	55,00 €	0,55 €
		Hidrosiembra 6.000 l sobre camión				0,55 €
3	h	Mano de obra				
		Capataz Jardiner	0,001	24,00 €	0,02 €	
		Oficial 1º Jardiner	0,007	22,07 €	0,15 €	
		Peón ordinario jardiner	0,015	18,00 €	0,27 €	
Subtotal mano de obra:					0,45 €	
4	%	Costes directos complementarios		0,02	0,00 €	0,02 €
		Costes directos complementarios				0,02 €
Coste de mantenimiento durante 10 años en los primeros 10 años			Costes directos (1+2+3+4)		2,05 €	

Imagen 91. Precio descompuesto de hidrosiembra enriquecida. Referencia de precios: Base de precios de edificación y urbanización. Gobierno Vasco, 2021

m2 Hidromanta						
Formación de pradera por hidromanta enriquecida en una pasada en zonas de clima Océánico subhúmedo, mediante una mezcla de especies herbáceas y leñosas, a razón de 35gr/m2 en cualquier clase de terreno y pendiente, con una superficie de 500 a 2000 m2, mediante hidrosiembra sobre camión, abonado, siembra y cubición empleando los materiales y proporciones indicados. Medida la superficie ejecutada.						
Código	Unidad	Descripción	Requerimiento	Precio unitario	Importe	
1	m3	Materiales				
		Agua	0,002	1,54 €	0,00 €	
		Abono (NPK 15-15-15)	0,035	0,74 €	0,03 €	
		Cubierta específica hidromanta	0,1	5,00 €	0,50 €	
		Estabilizante orgánico	0,02	4,23 €	0,08 €	
		Acidos húmicos	0,005	2,18 €	0,01 €	
		Semillas hidrosembradora herbáceas	0,033	5,22 €	0,17 €	
		Semillas hidrosembradora leñosas	0,002	63,31 €	0,13 €	
		Tierra vegetal cribada	0,002	25,00 €	0,00 €	
		Subtotal materiales:				
2	h	Equipo y maquinaria		0,010	55,00 €	0,55 €
		Hidrosiembra 6.000 l sobre camión				0,55 €
3	h	Mano de obra				
		Capataz jardiner	0,001	24,00 €	0,02 €	
		Oficial 1º Jardiner	0,005	22,07 €	0,11 €	
		Peón ordinario jardiner	0,012	18,00 €	0,22 €	
Subtotal mano de obra:					0,35 €	
4	%	Costes directos complementarios		0,02	0,00 €	0,02 €
		Costes directos complementarios				0,02 €
Coste de mantenimiento durante 10 años en los primeros 10 años						2,54 €
Costes directos (1+2+3+4)						2,54 €

Imagen 92. Precio descompuesto de hidromanta (referencia de precios. Base de precios de edificación y urbanización Gobierno Vasco, 2021

7.2 TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN

7.2.1 Estaquillado



Imagen 93. Detalle de estaquillado. Fuente: Florineth y P. Sangalli - SCIA S.L.

7.2.1.1 Definición y alcance

En este capítulo se aborda una de las técnicas de base de la bioingeniería del paisaje: el estaquillado. Técnica de estabilización consistente en la implantación de estacas vivas de especies autóctonas (que asegurará la capacidad de adaptarse a las condiciones en la que tendrán que desarrollarse), con capacidad de reproducción vegetativa y de emitir raíces adventicias, que se insertan perpendicularmente en el terreno con objeto de que, al brotar y desarrollarse, su aparato radical lo estabilice y lo proteja frente la erosión. La estaca viva es un fragmento no ramificado de 3 a 10 cm de diámetro y de 50 a 150 cm de longitud.

Se utiliza como técnica de estabilización en sí misma cuando se coloca a tresbolillo sobre el terreno o como complemento a otras técnicas de bioingeniería como en entramados de madera, enrejado vivo, gaviones, escollera vegetalizada o muros verdes.

Las principales ventajas de esta técnica son: Se trata de una técnica de estabilización de superficies de nueva formación de simple ejecución y bajo precio, que inicialmente tiene un efecto local, pero que se extiende sobre la superficie tras el desarrollo de la planta (6 meses a 1-2 años en función de las especies utilizadas). En cualquier caso, los sistemas radicales aumentan la resistencia a cortante del suelo en profundidades de hasta 0,5 m, dependiendo de las especies utilizadas.

7.2.1.2 Aplicaciones

Esta técnica se emplea con efectividad en los siguientes casos:

- En taludes de pendiente limitada (hasta 35°) de márgenes de ríos y lagos como elemento de revegetación.
- En ámbito fluvial se emplea para la reconstrucción de la primera línea de plantas flexibles como salicáceas o similares.
- En el control de la erosión superficial se utiliza para sujetar los materiales de recubrimiento como mantas o mallas orgánicas o sintéticas.
- Entre otras técnicas de estabilización sirve para estabilizar áreas intermedias.
- En pequeñas depresiones que se encuentren frecuentemente encharcadas para su reparación.
- En intersticios y grietas de escolleras, muros y gaviones, como piquetas vivas en la colocación de geo sintéticos, mantas orgánicas, fajinas y trenzados de ramas, entre otras.

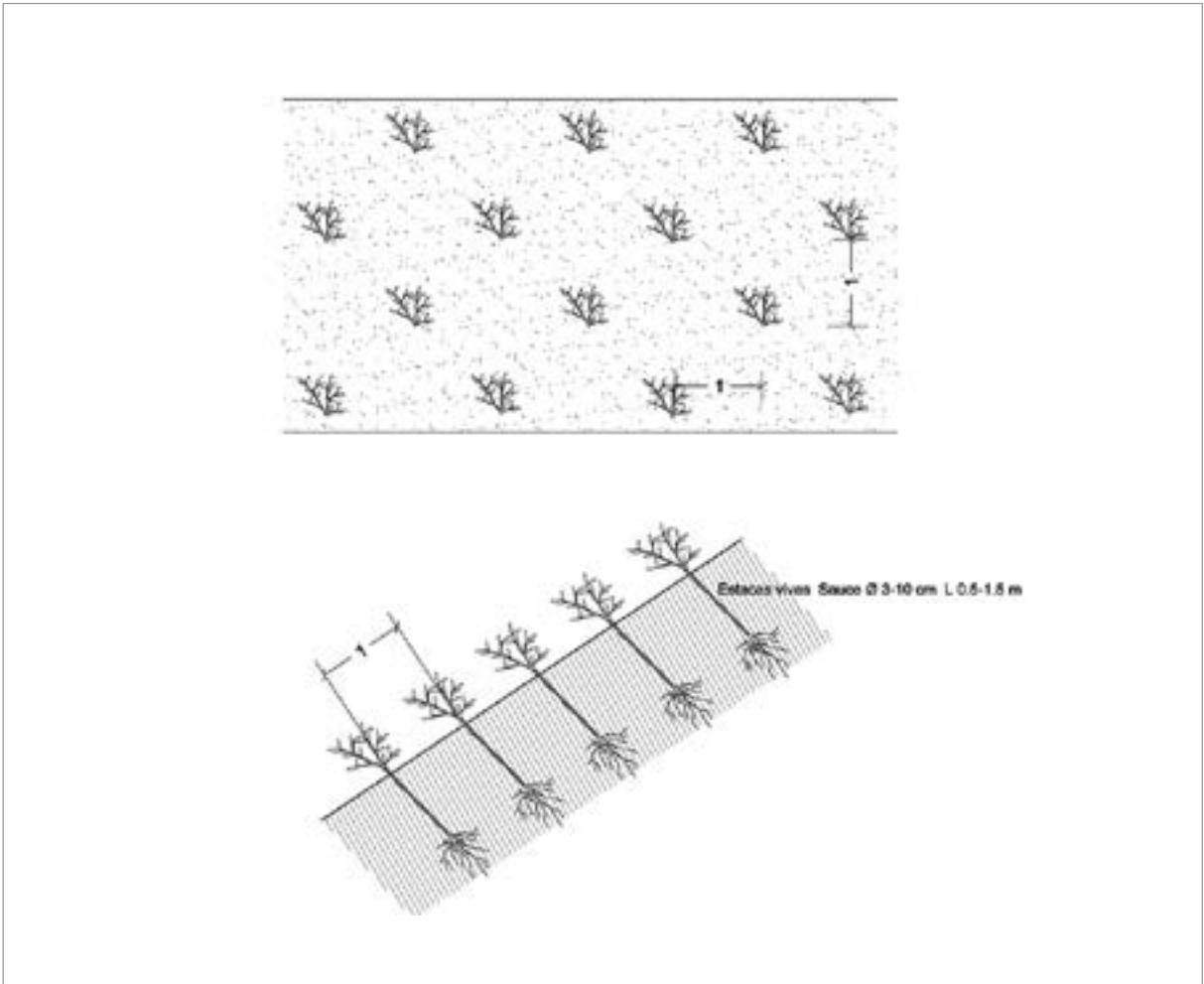


Imagen 94. Estaquillado: esquema constructivo. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.

7.2.1.3 Materiales

El material para utilizar proviene de especies leñosas autóctonas pioneras, pertenecientes a la serie de vegetación potencial de la zona y con características biotécnicas. Es decir, con características biológicas y técnicas que las hacen aptas para la utilización en estructuras de bioingeniería del paisaje.

La vegetación debe utilizarse en periodo de parada vegetativa extendida: de finales de octubre a primeros de abril. La colocación es a tresbolillo y la densidad adecuada es de 2 - 5 plantas/m², dependiendo de las condiciones y especies utilizadas: a mayor tamaño final, menor densidad. Es importante asegurar un mínimo de dos yemas en la parte enterrada y una en la parte aérea con objeto de que vuelva a rebrotar.

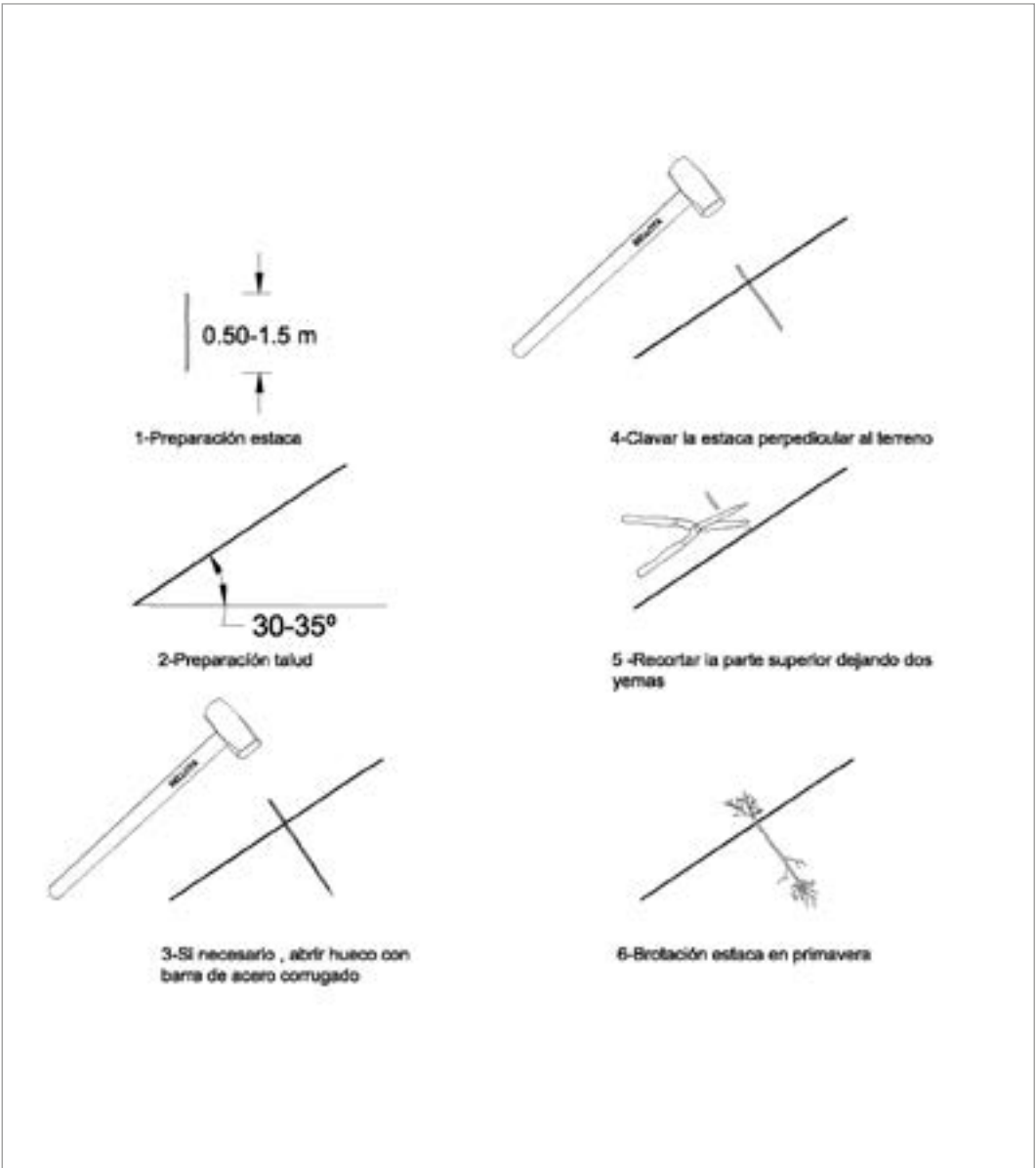
En el epígrafe 4.3.1. *Materiales vegetales vivos y propiedades biotécnicas* se detallan las características biológicas y técnicas de las especies más utilizadas en Bizkaia.

7.2.1.4 Ejecución de las obras

- Las estacas deben de prepararse preferiblemente el mismo día de su ejecución, siguiendo los pasos:
1. La estaca se prepara de manera que se pueda distinguir su polaridad: se corta el extremo basal en bisel y el extremo distal recto.
 2. Si es necesario se desbroza y limpia la superficie del terreno. En nueva obra se ataluzo el terreno con una inclinación de hasta 35° de pendiente máxima.

- 3. Para insertar las estacas se abre un hueco previo con la ayuda de una barra de acero corrugado y se clavan con la ayuda de una maza de madera. Se clavarán las estacas vivas de manera perpendicular al terreno. Las yemas deberán orientarse hacia arriba, insertando la parte en bisel en el mismo.
- 4. Se introduce 3/4 de su longitud en el suelo, de manera que queden comprimidas en el hueco y ofrezcan cierta resistencia en su inserción. En caso de estacas colocadas en estructuras de muro o escolleras, los huecos deberán ser rellenados con material inerte o suelo estructural (ver capítulo Escollera vegetada o vegetalizada.
- 5. A continuación, se cortan al bies con un corte neto dejando un mínimo de una o dos yemas en el exterior.
- 6. La densidad de plantación depende de la pendiente del talud y la necesidad de estabilización. Se establecen para las condiciones de los suelos de Bizkaia entre 2 a 5 estacas por m². Normalmente se colocan en las 2/3 partes inferiores del talud.
- 7. Si fuera necesario, se realiza un riego de apoyo tras la implantación.

Imagen 95. Fases del proceso constructivo del estaquillado. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



7.2.1.5 Control de calidad

En el caso del material vegetal vivo, concretamente las estacas o varas, la procedencia será de zonas próximas a la obra. En el caso de planta de vivero, se certificará el origen del material que será preferentemente de Bizkaia. En ambos casos, se considera admisible hasta un 30 % de marras o pérdidas durante el primer año.El Director de la Obra podrá exigir en cualquier momento la realización de cualquiera de los ensayos indicados en el epígrafe 8.1. Control de calidad.

7.2.1.6 Medición y abono

El estaquillado se medirá por unidad realmente colocada y en su medición se considerarán incluidas la recogida del material vegetal, su suministro y su colocación.

7.2.1.7 Recomendaciones

- Se trata de una técnica que requiere pequeños movimientos de tierra (básicamente un reperfilado del talud). La respuesta de la técnica frente la erosión no es inmediata, por lo que es necesario sembrar las superficies después del estaquillado o bien emplear un geotextil biodegradable como una malla orgánica.
- Las estacas deben tener la longitud adecuada en función de la pendiente del talud; así como, del tamaño de las estructuras donde se insertan. Tanto en gaviones como en escolleras vegetalizadas, las estacas deben llegar al trasdós garantizando el contacto con el terreno natural. Uno de los principales problemas es que generalmente las estacas son demasiado cortas o que se incluye una lámina geotextil que impide el correcto enraizamiento.
- El desarrollo de la vegetación, aunque rápido requiere de 1-2 años para que los efectos de refuerzo de la vegetación sean completos.
- Necesita de abundante material vegetal.

7.2.1.8 Propuesta de precio descompuesto: estaquillado

Se establecen dos precios: el precio por unidad de estaquillado y el precio por m² de estaquillado en estabilización.

136 Estaquillado					
Preparación, suministro y colocación de estacas de especies leñosas con capacidad de reproducción vegetativa, recogidas en zonas cercanas a la obra (en un radio de 10 km) de ejemplares de dos años, con una longitud mínima de 50 cm y diámetros de 2 a 5 cm insertadas en el terreno con una disposición perpendicular al mismo. Medida la unidad de estaca					
Código	Unidad	Descripción	Recuento	Precio unitario	Importe
1	ud	Materiales			
		Estaca preparada	1.00	0.80 €	0.80 €
		Subtotal materiales:			0.80 €
2	m	Equipo y maquinaria			
		Carrilón 10x33 sección total al grda 10t	0.002	35	0.07 €
		Motocultiva	0.003	3.5	0.01 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			0.08 €
3	m	Mano de obra			
		Carpas Obra civil	0.01	24.00 €	0.12 €
		Obra 1ª construcción de obra civil	0.03	22.07 €	0.66 €
		Pelo ordinario construcción	0.06	18.00 €	0.90 €
		Subtotal mano de obra:			1.68 €
4	%	Costes directos complementarios			
		Costes directos complementarios	0.02	1.77 €	0.04 €
Coste de mantenimiento decenal 18.87% en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4):		2.60 €

Imagen 96. Precio descompuesto de estaquillado por estaquilla. Referencia de precios: Base de precios de edificación y urbanización. Gobierno Vasco, 2021

m2		Estaquillado			
Preparación , suministro y colocación de m2 de estacas de especies leñosas con capacidad de reproducción vegetativa, recogidas en zonas cercanas a la obra (en un radio de 10 km) de ejemplares de dos años, con una longitud mínima de 50 cm y diámetros de 2 a 5 cm insertadas en el terreno con una disposición perpendicular en taludes no superiores a 35 grados. Densidad 3 estcas /m2 a tres bollos.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	ud	Materiales			
		Estaquilla preparación	3,00	0,80 €	2,40 €
			Subtotal materiales:		2,40 €
2	h	Equipo y maquinaria			
		Camión 10m3 tracción total c/ grúa 16t	0,006	35	0,21 €
	h	Motosierra	0,010	3,5	0,04 €
			Subtotal equipo y maquinaria:		0,21 €
3	h	Mano de obra			
		Capataz Obra civil	0,01	24,89 €	0,25 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil.	0,10	22,07 €	2,21 €
	h	Peón ordinario construcción.	0,20	18,00 €	3,60 €
			Subtotal mano de obra:		6,06 €
4	%	Costes directos complementarios			
		Costes directos complementarios	0,02	6,27 €	0,13 €
Coste de mantenimiento decenal: 18,87€ en los primeros 10 años			Costes directos (1+2+3+4):		8,79 €

Imagen 97. Precio descompuesto de estaquillado por m². Referencia de precios:
Base de precios de edificación y urbanización. Gobierno Vasco, 2021

7.2.1.9 Cálculo

En este punto se recogen los parámetros obtenidos mediante los modelos de refuerzo suelo-raíces o a través de ensayos de campo (Böhm, 1979) y/o a partir de la bibliografía existente.

Los parámetros utilizados en las fases de diseño y proyecto son:

Resistencia a tracción de las raíces: para la caracterización de este parámetro se pueden realizar trabajos de campo y ensayos de resistencia a tracción de las muestras. Cuando lo anterior no sea posible, se podrán utilizar valores de resistencia media a tracción de las raíces publicados en la bibliografía existente al respecto.

Resistencia al arranque del sistema radical (pull out strength): este parámetro está relacionado con el anterior. Para su definición se pueden realizar trabajos de campo según Norris (2005). Cuando lo anterior no sea posible, se podrán utilizar valores de resistencia al arranque publicados en la bibliografía existente.

En caso de no encontrar información sobre la resistencia al arranque de la especie utilizada en la obra, ésta se podrá calcular de forma aproximada aplicando un factor de 0,65 (Norris, 2005) o 0,6 (Greenwood, 2006) sobre valor de la resistencia a tracción de la raíz.

En general, para los dos anteriores parámetros se recomienda realizar trabajos de campo para su caracterización. Esto permitirá disponer de datos adaptados (o similares) a la zona de intervención y, aparte, permitirá ir generando una base de datos propia, necesaria para el correcto dimensionado de las obras.

7.2.1.10 Efectos del desarrollo de la vegetación en las comprobaciones de estabilidad

Tanto la “cohesión adicional debida a las raíces de las plantas” como los “efectos sobre los empujes del terreno” se desarrollan ampliamente en el epígrafe 6.3.2. *Efectos del desarrollo de la vegetación en las comprobaciones de estabilidad.*

7.2 TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN

7.2.2 Fajina



Imagen 98. Detalle de fajina. Fuente: F. Florineth y P. Sangalli - SCIA S.L.

7.2.2.1 Definición y alcance

La fajina viva es una técnica de estabilización viva de margen consistente en la confección de un haz cilíndrico de ramaje de especies leñosas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa de diámetro comprendido entre 20 y 40 cm. Las ramas flexibles, largas, rectas en parada vegetativa. Contarán con yemas de crecimiento activas y tendrán una longitud de 150 cm a 200 cm y un diámetro comprendido entre 1 cm y 4 cm. La anchura de la fajina será de unos 30 cm a 50 cm, en función de su empleo. Las ramas entrelazadas se atan cada metro.

El material para utilizar proviene de especies leñosas autóctonas pioneras, pertenecientes a la serie de vegetación potencial de la zona y con características biotécnicas, es decir, con características biológicas y técnicas que las hacen aptas para la utilización en estructuras de bioingeniería del paisaje.

En el caso concreto del TH de Bizkaia se emplean sobre todo *Salix atrocinerea*, *Salix purpurea* y *Tamarix gallica*.

Las principales ventajas de esta técnica son:

Fajinas de estabilización:

- La respuesta de la técnica frente la erosión es inmediata, desde el momento de su ejecución incluso antes de que brote.
- El desarrollo de la vegetación es rápido, en 1-2 años los efectos de refuerzo de la vegetación son completos.
- La ejecución es fácil, rápida y los costes son bajos (sólo requiere pequeños movimientos de tierras, básicamente un perfilado de la ladera).

Fajinas de drenaje:

- El efecto drenante se consigue tanto con la estructura de la fajina como con el funcionamiento de la vegetación cuando se desarrolla.
- Es un sistema rápido y de fácil ejecución.
- El efecto drenante se produce por el efecto de la evapotranspiración.

7.2.2.2 Aplicaciones

Se puede utilizar como:

- Técnica de estabilización al pie de margen o de talud-Fajina de estabilización.
- Técnica de drenaje de ladera -Fajina de drenaje.
- Elemento de relleno de estructuras de madera, generalmente fluviales, como entramados, empalizadas o esteras de ramaje.

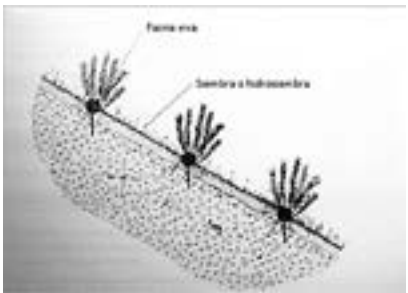


Imagen 99. Fajina de estabilización de talud.
Fuente: Manuale Ingegneria Naturalistica - AIPIN

Fajina como técnica de estabilización

En el caso de que las fajinas tengan como función principal la estabilización (imagen 99, página anterior), se colocan a en zanjás dispuestas siguiendo la curva de nivel.

Estas fajinas se sujetan con estacas o piquetas al terreno y se cubren de tierra.

Fajina como técnica de drenaje

En el caso de que las fajinas tengan como función el drenaje (imagen 100), se colocan formando un ángulo en pendientes húmedas para favorecer el drenaje y reducir la erosión superficial.

Generalmente se colocan en forma de espina de pez.

La técnica de las fajinas vivas se puede combinar con otras técnicas de estabilización como trenzados de mimbre vivos o estaquillados.

Esta técnica se emplea con efectividad en los siguientes casos:

Estabilización:

- Estabilización del talud mediante la creación de barreras que controlan la erosión.
- Estabilización de pie de margen fluvial en ríos con energía media y con caudales medios.
- Protección contra deslizamientos superficiales.
- Sirve para reducir la pendiente efectiva, quedando está dividida en tramos cortos por las fajinas.

Drenaje:

- Las fajinas vivas pueden utilizarse como drenes subsuperficiales para controlar las aguas de escorrentía.
- Impedir que las fisuras se conviertan en grandes cárcavas.
- Reparar pequeñas cárcavas con una profundidad máxima de 1 m y un ancho máximo de 2 m.
- Fortalecer canales de drenaje naturales en sumideros y sitios de descarga de las cunetas.

Relleno de estructuras como entramados o empalizadas fluviales:

Se utilizan para evitar el lavado de las estructuras.

7.2.2.3 Materiales

En los siguientes apartados se describen los materiales a utilizar para realizar la fajina.

- Piquetas de madera seca o muerta de longitud igual o superior a 100 cm y un diámetro de 7 cm a 10 cm. En terrenos más rocosos se puede emplear también barras de acero corrugado de 12 mm de diámetro.
- Alambre recocido o galvanizado de 2 mm a 3 mm de diámetro, cuerda o fibras naturales.



Imagen100. Fajina: detalle constructivo.
Fuente: Manuale Ingegneria Naturalistica - AIPIN

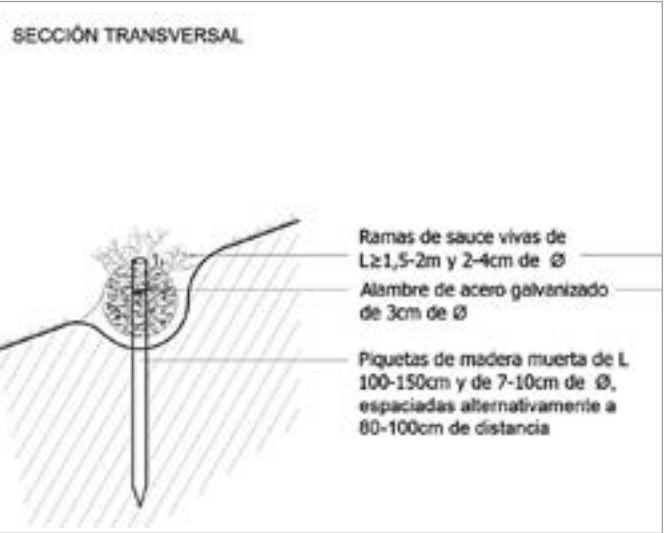


Imagen 101. Fajina: detalle constructivo.
Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.

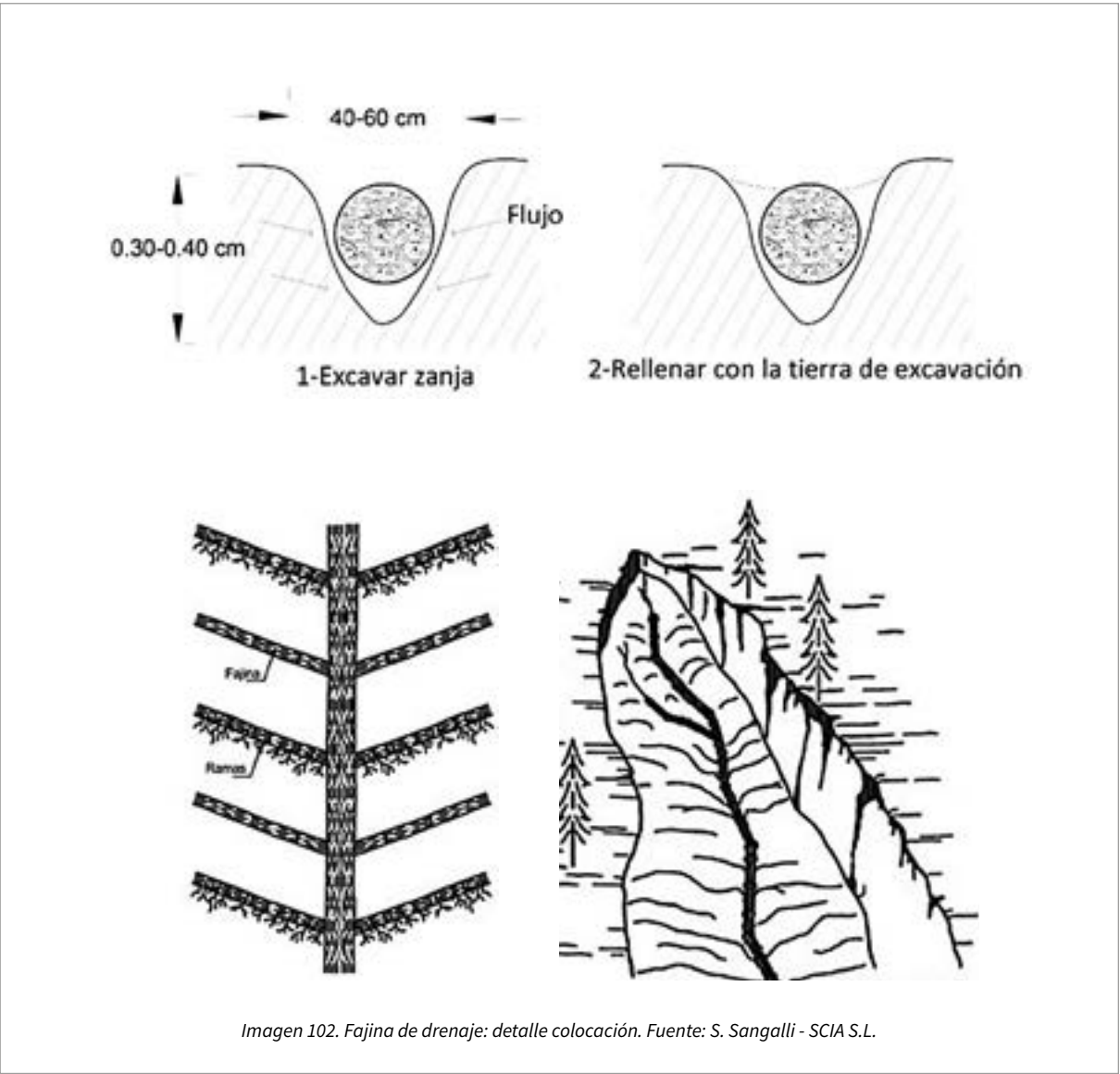


Imagen 102. Fajina de drenaje: detalle colocación. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.

7.2.2.4 Ejecución de las obras

En la construcción de la fajina se emplean las ramas, material flexible de diámetro de hasta 4 cm, con una estimación de 1 m³ de ramaje por 10 m lineales de fajina. Las fajinas tienen por lo general entre 30 a 50 cm de diámetro.

La vegetación debe utilizarse durante el periodo de parada vegetativa extendida: de finales de octubre a primeros de abril.

Las fajinas vivas deben de prepararse inmediatamente antes de su colocación en el terreno, siguiendo los siguientes pasos:

1. La fajina se confecciona entrelazando las ramas unas con otras, desde la base, de manera que se formen haces de ramas de unos 30-40 cm de diámetro y de 3-5 m de longitud, atándolas con alambre o cuerda a cada 50 cm de distancia y tensándolas de manera que las ramas queden bien sujetas. Los ápices de estas deben quedar siempre en la misma dirección, especialmente cuando se emplea en margen fluvial o en drenaje.
2. Se abren las zanjas de 30 a 50 cm. Existen diferencias en función de la función de la fajina:

Fajina de estabilización:

- En taludes la zanja se lleva a cabo siguiendo la curva de nivel.
- En entornos fluviales la zanja se lleva a cabo a nivel medio de las aguas. El sentido de la fajina es con los ápices orientados aguas abajo de manera que no sean problemáticos.

Fajinas de drenaje:

- Las obras se realizan de abajo hacia arriba.
 - Las zanjas se llevan a cabo en forma de espina de pez: una zanja principal con brazos que conectan zanjas secundarias con ángulos laterales de entre 20° y 45°.
3. Se coloca la fajina viva confeccionada previamente dentro de la zanja de forma que quede completamente enterrada, enrasada con el terreno. En la base de la fajina pueden colocarse piedras de distinto tamaño como elemento de protección.
 4. Se fija la fajina al terreno atravesándola mediante piquetas de madera o con barras de acero corrugado, colocándolas a una distancia entre sí de 0,8-1 m y orientándolas alternativamente con objeto de que la estructura sea más elástica. Las piquetas tendrán una longitud de 100-150 cm y un diámetro de 7-10 cm.

Imagen 103. Fajina: esquema constructivo. Fuente: NTJ

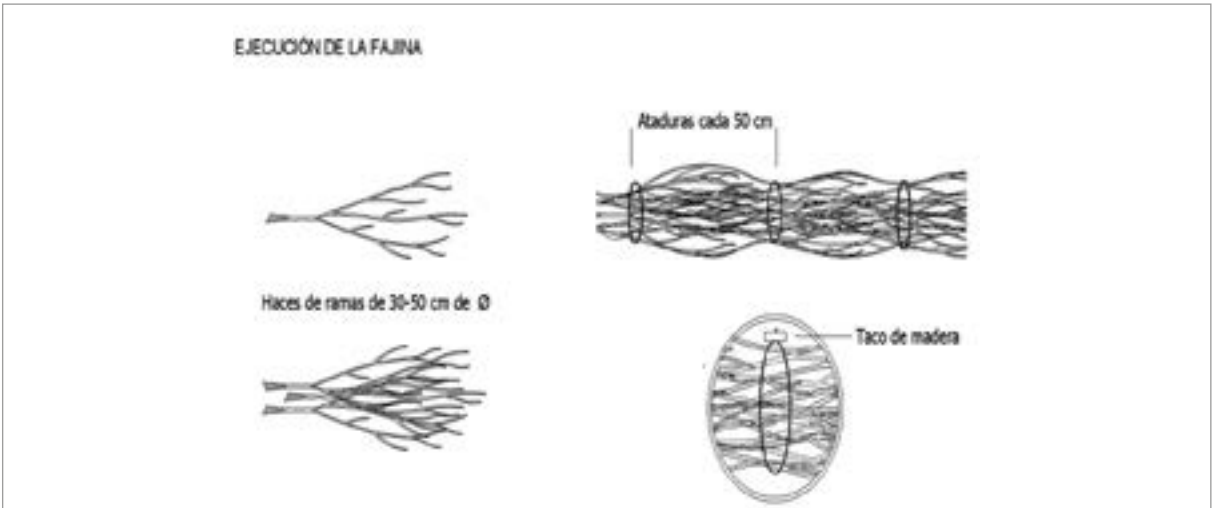


Imagen 104. Fajina de drenaje de la variante Bergara GI-627. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L. y A. Bea

5. La tierra extraída de se incorporará a lo largo de los lados de la fajina, compactándola para evitar la presencia de huecos de aire.
6. En el caso particular de las fajinas de drenaje, los drenes centrales pueden rellenarse con varias fajinas, dependiendo del largo de la zanja.

7.2.2.5 Control de calidad

En el caso del material vegetal vivo, concretamente el ramaje, la procedencia será de zonas próximas a la obra, preferiblemente de Bizkaia, y se obtendrá de plantas localizadas en las inmediaciones de la obra.

Por lo general, las fajinas brotan con algo de retraso con respecto a la brotación de las especies en la naturaleza (2—3 semanas). El nivel de brotación debe ser uniforme a lo largo de toda la fajina.

Se recomienda la realización de ensayos de material vegetal indicados en el epígrafe 7.1 Control de calidad.

7.2.2.6 Medición y abono

La fajina se medirá por metro lineal realmente colocada y en su medición se considerarán incluidas la recogida del material vegetal, su suministro y su colocación.

7.2.2.7 Recomendaciones

- Las fajinas deben colocarse empezando la obra desde la parte baja hacia la parte alta.
- La disposición completamente horizontal está más indicada en los taludes secos, ya que pueden actuar como interceptor de agua. Por el contrario, una pequeña inclinación de las hileras favorece que el agua corra.
- Es importante que las fajinas estén en contacto directo con el terreno.
- Se deben realizar en parada vegetativa.

Fajinas de estabilización

- Los sistemas radicales aumentan la resistencia a cortante del suelo en profundidades de hasta 0,5 m, dependiendo de las especies utilizadas.
- El efecto estabilizador es limitado, por lo que se propone utilizar esta técnica solo para deslizamientos o estabilizaciones superficiales.

Fajinas de drenaje

- Se colocan en el camino más corto a lo largo de la ladera, siguiendo el recorrido del agua.
- En los puntos de mayor pendiente, las fajinas se pueden armar mediante estacas o varas, de manera que sean más robustas.
- Son eficaces siempre que el agua sea superficial; por tanto, no sirven para drenar en profundidad.



Imágenes 105. Fajina de drenaje con manta de protección. Imagen 106. Detalle de fajina de drenaje y aspecto tras 6 meses desde su ejecución. Fuente: F. Florineth

7.2.2.8 Propuesta de precio descompuesto: fajina viva

Imagen 107. Precio descompuesto de fajina drenante en ladera. Referencia de precios: Base de precios de edificación y urbanización. Gobierno Vasco, 2021

m Fajina drenante en ladera					
Preparación , suministro y colocación de metro lineal de fajina de especies leñosas con capacidad de reproducción vegetativa, recogidas en zonas cercanas a la obra (en un radio de 25 km) de ejemplares de dos años, con un diámetro de 30 cm insertadas en el terreno mediante piquetas de mdera Incluye la excavación y el relleno posterior con el terreno de la excavación.					
Código	Unidad	Descripción	Precio		Importe
			Rendimiento	unitario	
1		Materiales			
	m3	Material vegetal para fajina	0,10	80,00 €	8,00 €
	ud	Piqueta en madera	1,00	10,00 €	10,00 €
	Kg	Alambre	0,50	4,00 €	2,00 €
		Subtotal materiales:			20,00 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Camión 10m3 tracción total c/ grúa 16t	0,020	35,00 €	0,70 €
	h	Motosierra	0,050	3,50 €	0,18 €
	h	Retroexcavadora sobre orugas de 180 KW	0,080	50,14 €	4,01 €
		Subtotal equipo y maquina:			4,89 €
3		Mano de obra			
	h	Capataz Obra civil	0,01	24,89 €	0,12 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,60	22,07 €	13,24 €
	h	Peón ordinario construcción	0,60	18,00 €	10,80 €
		Subtotal mano de obra:			24,17 €
4		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	0,02	29,05 €	0,58 €
Coste de mantenimiento decenal: 18,87€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4):		39,63 €

7.2.2.9 Cálculo

No existen a día de hoy datos acerca de la estabilidad garantizada por una fajina de estabilización. De manera empírica se han establecido las distancias a las que se deben colocar en función de la pendiente existente.

Estas son las distancias tanto para el control de la erosión como para las fajinas de drenaje.

En la tabla 12 se incluyen, a título indicativo, los parámetros de resistencia de las fajinas de ribera por si se requiriese llevar a cabo una actuación en alguna regata que interfiera con la infraestructura.

Pendiente nH:mH	Distancia entre zanjas de fajinas (metros)	
	En curva de nivel	Con pendiente para drenaje
1:1 a 1,5:1	1,0 a 1,2	0,6 a 1,0
1,5:1 a 2:1	1,2 a 1,5	1,0 a 1,5
2:1 a 2,5:1	1,5 a 1,8	1,0 a 1,5
2,5:1 a 3:1	1,8 a 2,4	1,2 a 1,5
3 :1 a 3,5:1	2,4 a 2,7	1,5 a 2,0
3,5:1 a 4:1	2,7 a 3,0	1,8 a 2,4

Hay que distinguir los umbrales de resistencia antes y después del desarrollo del material vivo empleado.

La colocación de una malla orgánica permite que los valores de resistencia al arrastre sean mayores desde el primer momento. En este caso, los valores límite son 2,5 m/s y 250 N/m².

En el epígrafe 4.3.1 *Materiales vegetales vivos y propiedades biotécnicas* se detallan las características biológicas y técnicas de las especies más utilizadas en Bizkaia.

Fase	Tensión tangencial admisible (N/m²)	Velocidad admisible (m/s)
Antes del desarrollo del material vivo	100	1,0
Después del desarrollo del material vivo	250	3,0

7.2 TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN

7.2.3 Lechos de ramaje



Imagen 108. Terraplén construido con lechos de ramaje. Fuente: Ugo Schiechtln. Autopista Brennero. Austria

7.2.3.1 Definición y alcance

Se trata de una técnica de estabilización indicada para deslizamientos superficiales y estabilización de taludes y márgenes. Consiste en construir hileras horizontales o subhorizontales de estacas vivas y/o plantas autóctonas enraizadas con capacidad para emitir raíces adventicias. Éstas se colocan dentro de una excavación inclinada con un ángulo aproximado de 5° a 10°. Se aplica en laderas que presentan deslizamientos superficiales o en taludes de carreteras y vías férreas con inclinaciones inferiores a 40°. El material vegetal ejerce una acción consolidante y drenante que, al disponerlo en hileras horizontales o ligeramente inclinadas con una separación de un par de metros entre ellas, logra prevenir la erosión superficial y favorece la reducción del agua, controlando así el flujo de escorrentía. Al interceptar el agua superficial, la disposición en hileras contrarresta eficazmente la erosión superficial y los pequeños movimientos de tierra, impidiendo que el agua adquiera la energía necesaria para mover las capas superficiales del sustrato, al tiempo que favorece la retención de agua y la escorrentía controlada.

El uso de material vegetativo vivo significa que, una vez enraizado y desarrollado, la consolidación y el drenaje del suelo están garantizados gracias al sistema radicular de la especie vegetal y a la transpiración de las hojas, que consumen agua eliminándola del suelo a través de las raíces.

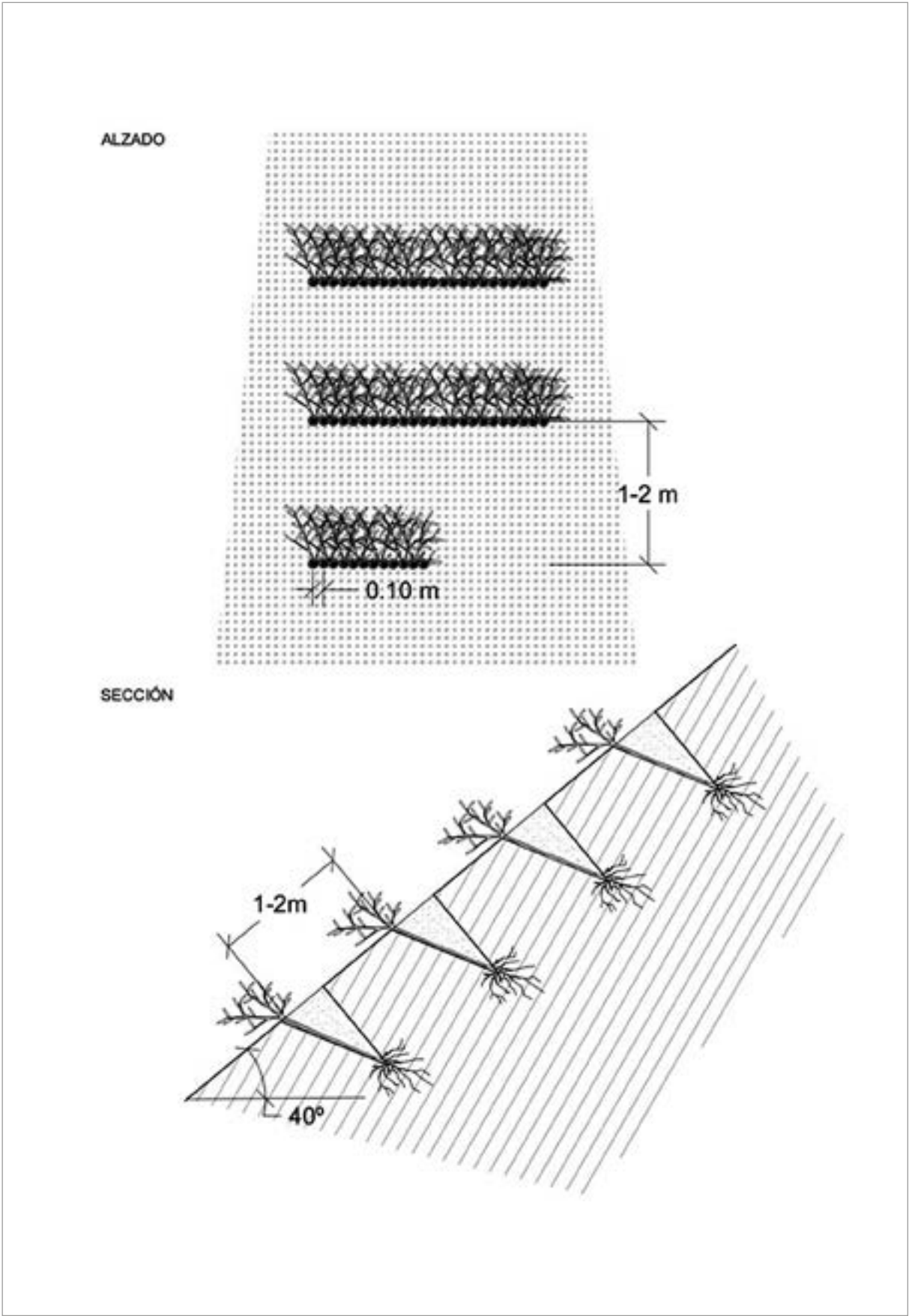
En función del material empleado se distinguen tres tipos de lechos de ramaje:

- **Lechos de estacas:** tiene un excelente efecto en profundidad.
- **Lechos de planta enraizada:** proporciona una menor consolidación del terreno que en el caso anterior, pero resulta eficaz inmediatamente tras la implantación.
- **Lechos mixtos de estacas y plantas:** tiene unos costes algo más elevados que los otros dos tipos de lechos, pero presenta la ventaja de conseguir rápidamente una asociación vegetal estable, compuesta tanto por especies pioneras (sauces), como definitivas (alisos).

En función de la disposición de material puede ser perpendicular a la pendiente o bien cruzado en diagonal.

Esta técnica también se puede mejorar mediante el uso de una manta orgánica, lo que proporciona un refuerzo mecánico adicional, siguiendo el sistema de construcción de las tierras reforzadas como inspiración.

Imagen 109. Perfil y alzado de la técnica de lechos de ramaje. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



7.2.3.2 Aplicaciones

Esta técnica se emplea con efectividad en los siguientes casos:

- En taludes de pendiente hasta 40°.
- En deslizamientos superficiales.
- En construcción de terraplenes en carreteras y vías férreas.
- En ámbito fluvial para la estabilización de márgenes de ríos y lagos con pendientes hasta 40°.
- Entre otras técnicas de estabilización y técnicas mixtas, sirve para estabilizar zonas de transición entre las mismas.

Las principales ventajas de esta técnica son:

- Ejecución rápida y sencilla: el desarrollo de la vegetación es rápido (en 1-2 años los efectos de refuerzo de la vegetación son completos).
- Consolidación profunda: gracias al enraizamiento profundo con efecto drenante, se evita tanto la erosión como el desplazamiento del suelo.
- Disminuye la velocidad de la escorrentía superficial, lo que a su vez reduce el movimiento de la tierra.
- Aumenta la infiltración efectiva del suelo durante las precipitaciones.
- Detiene tanto la nieve como la posible caída de pequeñas piedras.
- Revegetación rápida del talud: la plantación de árboles enraizados, especialmente en los lechos de plantas enraizadas, acelera la formación de una estructura de vegetación más estable.
- Creación de un depósito vegetal para otras intervenciones con material vivo que se extraerá de la naturaleza.
- Puede realizarse a mano o por medios mecánicos.
- Es fácilmente combinable con el drenaje tradicional, actuando como un drenaje en sí mismo.

Como desventajas cabe señalar:

- Requiere abundante material vivo.
- En el caso de los lechos mixtos que incluyen estacas y plantas, debido a las variaciones en la velocidad de crecimiento de los diferentes árboles, puede ocurrir que la vegetación que se desarrolla a partir de las plántulas enraizadas supere en crecimiento a la vegetación que se desarrolla a partir de las estacas, por lo que es necesario combinar una mayor proporción de estacas que de plántulas (2:1, por ejemplo).
- No puede utilizarse en pendientes con afloramientos rocosos o suelos poco profundos.
- Si el plano de deslizamiento es superior a dos metros, puede que el sistema radicular no llegue a ser interceptado.
- La intervención es geométrica, que se mantiene incluso años después de la intervención.
- Esta técnica, puede resultar costosa en el caso de no tener disponibilidad de material en las proximidades debido a la cantidad de material vegetal necesario.

7.2.3.3 Materiales

El material para utilizar proviene de especies leñosas autóctonas pioneras, pertenecientes a la serie de vegetación potencial de la zona y con características biotécnicas. Es decir, con características biológicas y técnicas que las hacen aptas para la utilización en estructuras de Bioingeniería del Paisaje.

La vegetación debe utilizarse en periodo de parada vegetativa extendida: de finales de octubre a primeros de abril. La densidad adecuada es de 5 - 10 plantas/m², dependiendo de las condiciones y especies utilizadas: a mayor tamaño final, menor densidad.

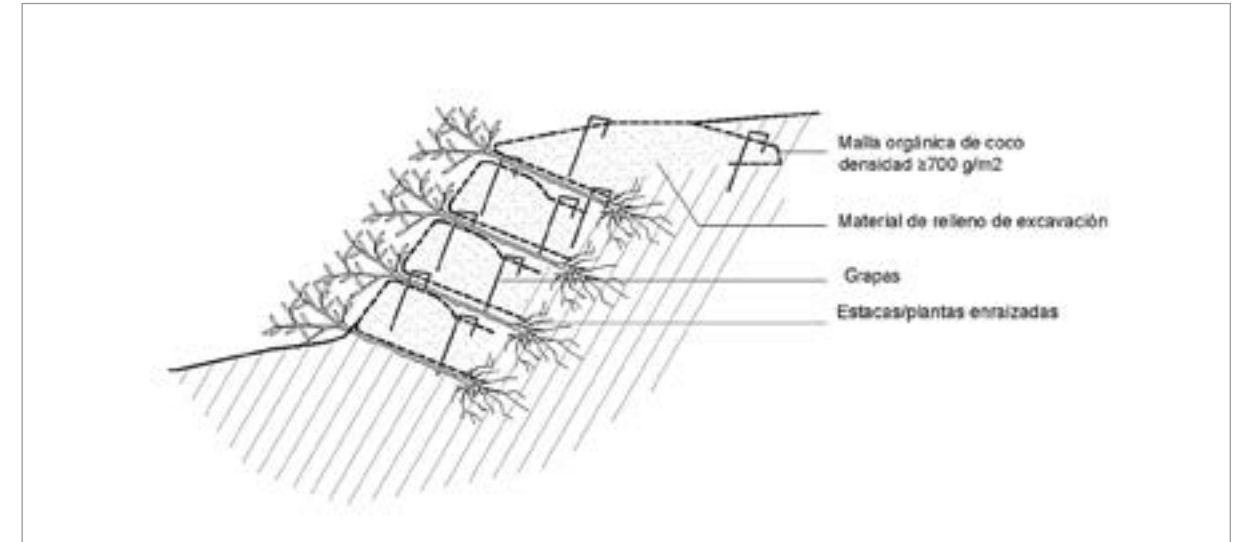


Imagen 110. Lechos de ramaje armados con manta orgánica. Fuente: S. Sangalli-SCIA S.L.

En el epígrafe 3.3.1 *Materiales vegetales vivos y propiedades biotécnicas* se detallan las características biológicas y técnicas de las especies más utilizadas en Bizkaia.

En función del tipo de lecho de ramaje puede utilizarse:

- **Lechos de estacas:** Estacas de especies autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa y de emitir raíces adventicias con una longitud superior a 100 cm (10÷20 cm mayor que la profundidad de la excavación) y preferiblemente un diámetro mínimo de 3-7 cm. En cada hilera se utilizan como mínimo 10 unidades por metro, dispuestos en forma de peine. Es importante asegurar un mínimo de dos yemas en la parte enterrada y una en la parte aérea con objeto de que vuelva a rebrotar.
- **Lechos de planta enraizada:** Plántulas enraizadas a raíz desnuda o en contenedor forestal de árboles autóctonos de especies frondosas resistentes al pastoreo de dos savias 1/1 con una altura de 100 cm (10÷20 cm > la profundidad de la excavación) y un diámetro de 1-3 cm. En cada hilera se utilizan como **mínimo de 10 unidades por metro**.
- **Lechos mixtos de estacas y plantas:** Estacas y plántulas mezcladas con una proporción del doble de estacas que de plántulas. En cada hilera se utilizan como mínimo 10 unidades por metro.

En los lechos de ramaje armados con manta orgánica se requiere, además:

- Mantas orgánicas de coco con una densidad ≥ 400 g/m².
- Grapas de acero corrugado de 6-8 mm de 60 cm con tres lados de 10 cm, 10 cm y 40 cm respectivamente.

7.2.3.4 Ejecución de las obras

Para la preparación de las estacas se deben tener en cuenta las incluidas en el apartado 7.2.1. *Estaquillado*.

La ejecución se llevará a cabo en tres pasos principalmente:

1. En una primera fase, se llevan a cabo las operaciones preliminares de preparación del terreno, lo cual incluye posibles desbroces y/o clareos, siega de la vegetación, modificaciones morfológicas, limpieza y retaluzado de las áreas inestables en caso de laderas deslizadas.
2. Se prepara el lugar de instalación excavando un plano horizontal con un contrapendiente mínimo de 10° (Stangl, 2006), con una profundidad de 70-100 cm. Si el trabajo se realiza manualmente, los pasos se dan siempre de abajo hacia arriba. En el caso de utilizar maquinaria, puede hacerse desde abajo o

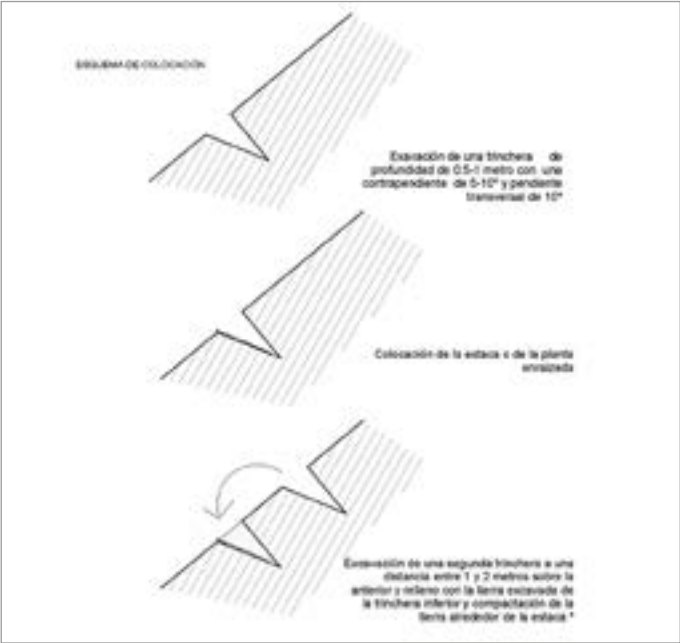


Imagen 111. Esquema de colocación. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.

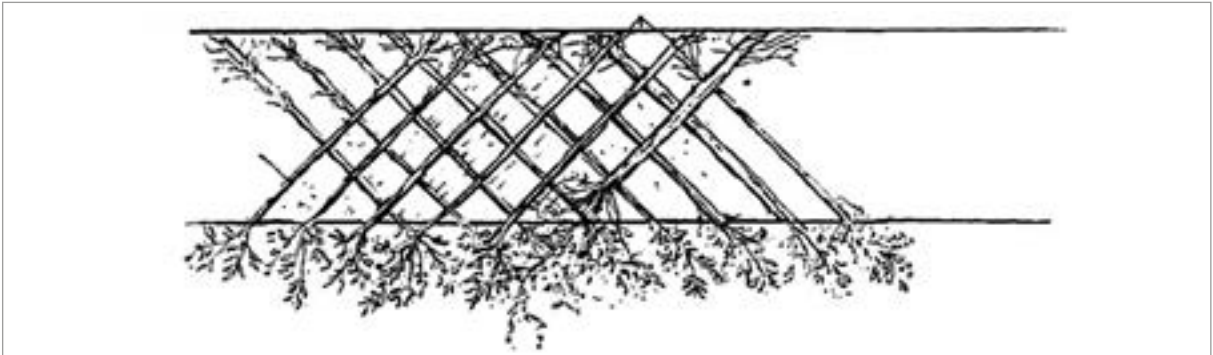
desde arriba en función de las condiciones de accesibilidad. Sin embargo, es preferible empezar desde arriba para garantizar una mayor seguridad de los trabajadores que colocan las estacas en los pasos realizados, ya que la máquina siempre se encontraría en un nivel inferior al de ellos. Por supuesto, esta norma también dependerá de la peligrosidad de la pendiente, la accesibilidad de la zona u otras condiciones que deben evaluarse previamente caso por caso.

3. A continuación, se coloca el material vegetal (ya sean estacas, plantas o una combinación de ambos), con una longitud suficiente en contacto con el trasdós y con la superficie de la zanja. De este modo, sobresalen aproximadamente 15-20 cm de la estructura (7-8 yemas).

En cuanto a la disposición espacial de los distintos elementos vegetales, existen dos posibilidades:

- Disposición paralela o en “peine” de los distintos elementos. Se utiliza siempre cuando se emplean plantones enraizados o mezclas de plantones y estacas, o en el caso de estacas. El material se dispone perpendicular a la dirección de excavación.
- Disposición cruzada de elementos vegetativos individuales. Se utiliza si sólo se emplean estacas. Cabe señalar que, según las investigaciones realizadas por Stangl en 2006, la disposición más eficaz del material vegetal es la disposición cruzada.

Imagen 112. Disposición cruzada de un lecho de ramaje



7.2.3.5 Control de calidad

En el caso de los lechos de ramaje, al igual que en el resto de las técnicas, el material vegetal vivo, concretamente las estacas o del ramaje la procedencia será de zonas próximas a la obra. En el caso de planta de vivero, se certificará el origen del material que será preferentemente de Bizkaia. En ambos casos, se considera admisible hasta un 30 % de marras o pérdidas durante el primer año.

Debido a la densidad de plantación, por lo general las plantas procedentes de las estacas o de las plantas enraizadas, al cabo de unos años a medida que van creciendo, su número va disminuyendo debido a la competencia existente. Por ejemplo, la función que ejerce un sauce adulto es equiparable a la que ejercen las diez estacas por metro inicialmente utilizadas en los lechos.

Se recomienda la realización de ensayos de material vegetal indicados en el epígrafe 8.1. *Control de calidad.*

7.2.3.6 Medición y abono

El lecho de ramaje se medirá por metro lineal realmente colocada y en su medición se considerarán incluidas la recogida del material vegetal, su suministro y su colocación.

7.2.3.7 Recomendaciones

- Se recomienda la ejecución en parada vegetativa excepto si se emplea arbolado o arbustos en contenedor forestal, pudiendo entonces ejecutarse también en primavera y otoño además del invierno.
- Se requiere una buena planificación de recolección de material vivo.
- Requiere mano de obra especializada.
- Se recomienda un mantenimiento mínimo de 2 años. Durante este periodo, sustituir el material vivo que no haya arraigado y llevar a cabo si necesario una entresaca o una poda al cabo de cuatro años.

7.2.3.8 Propuesta de precio descompuesto

Se establecen tres precios en función del tipo de lecho de ramaje empleado.

m Lechos de estacas				
Metro lineal de lecho de ramaje formado por estacas con capacidad de reproducción vegetativa, recogidas en zonas cercanas a la obra (en un radio de 10 km) de ejemplares de dos años , incluye la apertura de zanja de 0,50 a 1 m de profundidad con contrapendiente de 10 grados y la colocación de estacas en forma de peine o cruzadas así como el relleno con tierra de excavación.				
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento unitario	Precio
1	ud	Materiales		
		Estaca 3-7 cm de diámetro y 90-100 cm longitud	10,00	0,80 €
		Subtotal materiales:		8,00 €
2	h	Equipo y maquinaria		
		Camión 10m3 tracción total o/ grúa 16t	0,010	50,00 €
		Motosierra	0,100	3,5
		Retroexcavadora sobre orugas de 180 kW	0,200	50,14 €
		Subtotal equipo y máquina		10,88 €
3	h	Mano de obra		
		Capataz Obra civil	0,05	24,89 €
		Oficial 1ª construcción de obra civil	0,10	22,07 €
		Peón ordinario construcción	0,25	18,00 €
		Subtotal mano de obra:		7,95 €
4	%	Costes directos complementarios		
		Costes directos complementarios	0,02	18,83 €
		Coste de mantenimiento decenal: 18,87% en los primeros 10 años.		
		Costes directos (1+2+3+4):		27,21 €

Imagen 113. Precio descompuesto de lechos de estacas por m lineal (año 2022)

m Lechos de plantas				
Metro lineal de lecho de ramaje formado por plántulas enraizadas de dos savias de árboles autóctonos con capacidad reproducción vegetativa, incluye la apertura de zanja de 0,50 a 1 m de profundidad con contrapendiente de 10 grados y la colocación de plántulas en forma de pene así como el relleno con tierra de excavación				
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento unitario	Precio
1	ud	Materiales		
		Plántula a raíz desnuda dos savias	10,00	1,08 €
			Subtotal materiales:	10,80 €
2	h	Equipo y maquinaria		
		Camión 10m3 tracción total c/ grúa 18t	0,010	50
		Motosierra	0,100	2,5
		Retroexcavadora sobre orugas de 180 KW	0,250	50,14 €
			Subtotal equipo y maquina:	11,39 €
3	h	Mano de obra		
		Capataz Obra civil	0,05	24,88 €
		Oficial 1ª construcción de obra civil	0,10	22,07 €
		Peón ordinario construcción	0,25	18,00 €
			Subtotal mano de obra:	7,95 €
4	%	Costes directos complementarios		
		Costes directos complementarios	0,02	21,34 €
			Costes directos (1+2+3+4):	31,78 €
Coste de mantenimiento decenal 18,87% en los primeros 10 años				

Imagen 114. Precio descompuesto de estaquillado por m lineal (año 2021)

m Lechos de ramaje mixto					
Metro lineal de lecho de ramaje formado por plantulas enraizadas de dos savias de árboles autóctonos y estacas de especies con capacidad de reproducción vegetativa en proporción 1:2. Incluye la apertura de zanja de 0,50 a 1 m de profundidad con contrapendiente de 10 grados y la colocación de estacas en forma de pene así como el relleno con tierra de excavación					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
		Estaquilla preparación	6,80	0,80 €	4,80 €
		Plantula a raíz desnuda dos savias	4,80	1,00 €	4,00 €
		Subtotal materiales:			8,80 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Camión 10m3 tracción total c/ grúa 18t	0,006	35	0,21 €
	h	Motosierra	0,010	2,5	0,04 €
	h	Retroexcavadora sobre orugas de 180 Kw	0,250	50,14 €	12,54 €
		Subtotal equipo y maquina:			12,78 €
3		Mano de obra			
	h	Capataz Obra civil	0,05	24,88 €	1,24 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,10	22,07 €	2,21 €
	h	Peón ordinario construcción	0,25	18,00 €	4,50 €
		Subtotal mano de obra:			7,95 €
4		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	0,02	29,53 €	6,59 €
Coste de mantenimiento decenal: 18,37% en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4):		36,12 €

Imagen 115. Precio descompuesto de lechos de ramaje mixto por m lineal (2022)

7.2.3.9 Cálculo de los lechos de ramaje

Una vez el material vegetal haya enraizado y consolidado, se pueden incorporar los efectos de los lechos de ramaje en el análisis de estabilidad de la ladera sobre la que se ha actuado. Se trata, por tanto, de una comprobación de estabilidad a largo plazo.

Los efectos de refuerzo de la vegetación se traducirán en un valor de cohesión adicional obtenido a partir de los modelos de refuerzo de las raíces (ver epígrafe 6.3.2).

Toda la profundidad donde se considere que puede existir un efecto de refuerzo de la vegetación será representada como un suelo con un valor de cohesión igual a la suma de la cohesión del suelo (sin vegetación) más la cohesión adicional debido a las raíces.

Se podrá considerar un valor mínimo de profundidad de suelo con raíces entre 0,5 m y 1,0 m.

Se aconseja utilizar programas de análisis de estabilidad de taludes para obtener valores del factor de seguridad con y sin raíces. De esta manera se pueden valorar las mejoras obtenidas debido a la técnica de los lechos de ramaje.

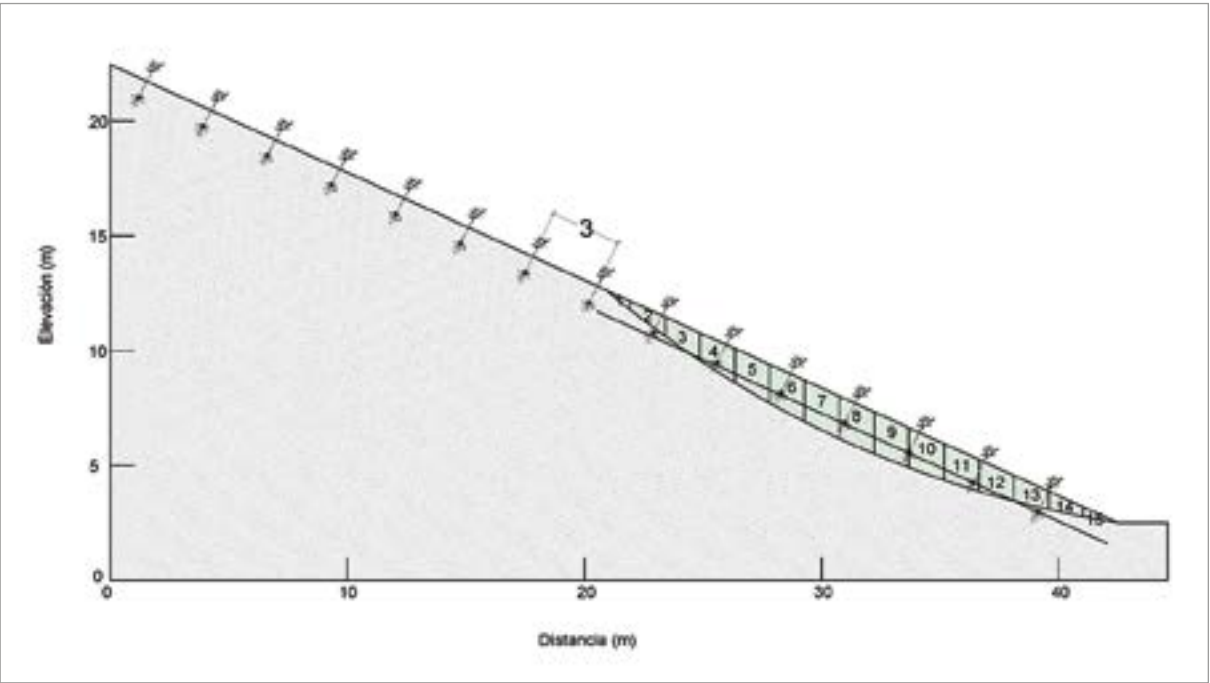


Imagen 116. Imagen mostrando una superficie de deslizamiento y la zona bajo la influencia del efecto de refuerzo de los sistemas radicales. Fuente: S. Sangalli-SCIA S.L.

De cara a ejemplificar cómo se incluyen los efectos de la vegetación en el análisis de estabilidad para el caso de lechos de ramaje o del uso de estacas vivas, se muestra a continuación la fórmula del factor de estabilidad de un suelo con raíces para el caso del método del talud infinito.

$$FS = \frac{c + ca}{(\gamma \cdot z \cdot \cos \beta + Wv) \cdot \sin \beta} + \frac{(\gamma \cdot z \cdot \cos \beta + Wv) \cdot \tan \phi}{(\gamma \cdot z \cdot \cos \beta + Wv) \cdot \tan \beta}$$

Donde:

c = cohesión del suelo sin vegetación (kPa)

ca = cohesión adicional debida al refuerzo de la vegetación (kPa)

Wv = sobrecarga debido al peso de la vegetación (kPa)

z = profundidad de la superficie de rotura (m)

γ = peso específico del terreno (kN/m³)

β = inclinación de la ladera

φ = ángulo de rozamiento del terreno

Para el cálculo del valor de la cohesión adicional se remite al lector al capítulo y datos incluidos en epígrafes del presente manual. Para la aplicación de dichos modelos de refuerzo, a falta de información concreta obtenido mediante trabajo de campo, se realizan las siguientes recomendaciones:

b = profundidad media del sistema radical (m). Se puede estimar como un tercio de la profundidad máxima del sistema radical. La profundidad máxima se puede estimar, a su vez, a partir de las relaciones alométricas de la especie vegetal utilizada. La variación en profundidad del área ocupada por las raíces se puede obtener a partir del modelo de distribución exponencial incluido y explicado en el presente manual (epígrafe 6.3.2).

7.2 TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN

7.2.4 Empalizadas



Imagen 117. Empalizadas vivas en ladera, apenas construidas y tras cuatro años. Valle Venosta, Italia. Fuente: F. Florineth

7.2.4.1 Definición y alcance

La empalizada viva es una técnica mixta de intervención para la estabilización de taludes y laderas. Consiste en una estructura de contención de madera con una disposición transversal a la línea de máxima pendiente del talud. Está compuesta por dos o más filas superpuestas de troncos, fijados con piquetas de madera o barras de acero corrugado, que permiten el enraizamiento de estacas o de arbustos con capacidad de reproducción vegetativa y, opcionalmente, de plantas enraizadas.

La técnica de las empalizadas vivas permite una cierta estabilización inmediata debido a la profundidad a la que se clava el sistema de fijación y posteriormente, al desarrollo de las raíces de las plantas implantadas.

Las empalizadas vivas se pueden dividir en dos grupos en función de su tamaño:

- **Empalizadas vivas altas**, si tamaño es superior a un metro.
- **Empalizadas vivas bajas**, si el tamaño es inferior al metro.

Las empalizadas vivas altas además de contener el suelo tienen la función de dar estabilidad a la parte superficial del talud o ladera, gracias a la acción ejercida por el sistema de raíces de la vegetación implantada. Su disposición a lo largo del talud puede ser continua, formar líneas horizontales, separadas de 2 a 4 m entre sí de acuerdo a las curvas de nivel o con una disposición escalonada, dispersa o al azar.

La disposición alterna y escalonada o aleatoria se utiliza para limitar la velocidad de escorrentía del agua, evitando así fenómenos de erosión en línea y la formación de surcos.

La longitud de las empalizadas debe ser tal que siempre se solapen con las situadas aguas arriba y aguas abajo, eliminando cualquier vía de flujo preferente.

Las empalizadas vivas bajas se utilizan en taludes con pendientes inferiores a las de las empalizadas altas y en suelos cuyos tamaños de partícula sea menor. Su disposición se lleva a cabo con una separación de 3 a 4 m entre ellas siguiendo las curvas de nivel, de forma continua o ligeramente inclinada o con una disposición escalonada, dispersa o al azar.

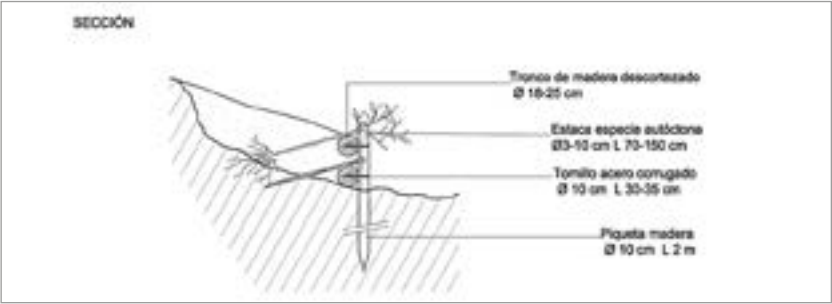


Imagen 118. Sección de empalizada. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.

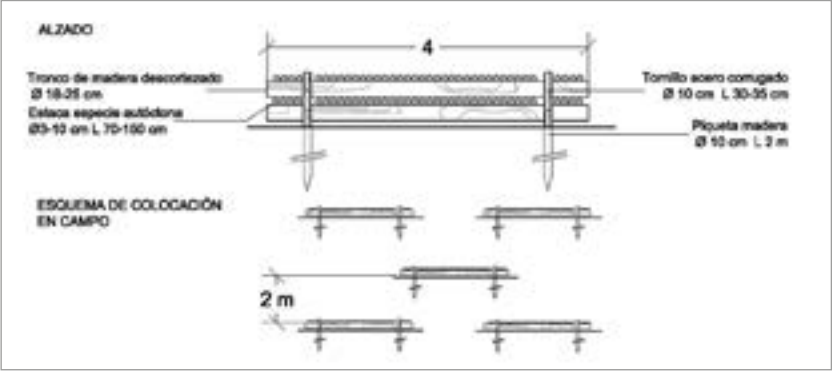


Imagen 119. Alzado y disposición de las empalizadas para el control de la escorrentía. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.

7.2.4.2 Aplicaciones

Esta técnica se emplea con efectividad en los siguientes casos:

- Estabilización de la superficie de taludes o laderas.
- Estabilización de taludes en la excavación.
- Consolidación de las cárcavas y surcos de la erosión.
- Estabilización superficial de taludes formados por material suelto.
- Control de la erosión en taludes o laderas afectadas por incendios.
- Control de surcos profundos y escarpados, en suelos suaves y con un tamaño de partícula fina (limo, arcilla, arena).
- Estabilización interna de nuevos perfiles de talud donde se aporta tierra.

Las principales ventajas de esta técnica son:

- El efecto de consolidación inmediato.
- La elasticidad estructural.
- La posible recreación de hábitat natural.
- La buena integración paisajística y medioambiental.

Como desventajas cabe señalar:

- Las empalizadas tienen un límite de altura, no recomendándose que tengan más de 1,5 metros de altura.
- El uso de la mano de obra es intenso y la instalación compleja.
- La madera se pudre con el tiempo, por lo que, además de un buen clavado, es necesario que los esquejes insertados en la estructura estén vivos y arraiguen profundamente, para que puedan sustituir la función de sostener y consolidar el talud una vez que la madera haya perdido su función.

7.2.4.3 Materiales

Los materiales necesarios parpar la construcción de una empalizada son:

- Troncos de madera descortezados, de 18 a 30 cm de diámetro y de 2 a 4 m de longitud.
- Clavos de acero galvanizado, de 10 mm de diámetro y de longitud igual a dos veces el diámetro de los troncos de madera usados. / Tornillos para madera de 10 mm de diámetro.
- Cuñas de madera para ser insertadas entre los troncos.
- Piquetas de acero galvanizado o corrugado, de 12 a 14 mm de diámetro y de 1,50 a 2,50 m de longitud, que se ponen delante de la primera hilera de troncos de la estructura para contrarrestar un posible deslizamiento de esta hacia adelante.
- Estacas vivas de 3-7 cm de diámetro y 50- 100 cm (10-20 cm mayor a la profundidad de la excavación). En cada hilera se utilizan como mínimo de 10 unidades por metro.
- Planta enraizada en alveolo cuando se trate de la variante de planta enraizada o mixta.
- Áridos y tierras de obra para el relleno de la estructura.

7.2.4.4 Ejecución de las obras

1. Remodelado del talud. Se procede al remodelado del talud o ladera con equipo mecánico y puntualmente completado con intervenciones manuales. Eliminar la presencia de perfiles convexos en la superficie del talud que impidan las operaciones posteriores.
2. Inserción de las piquetas de madera. Su inserción es vertical y se realiza a mano o con equipos de pilotaje o perforación, a una distancia máxima de 1 m y a una profundidad de clavado dentro del terreno de 0,70 m como mínimo y sobresaliendo 0,50 m como mínimo (de acuerdo con el cálculo para la estabilidad geotécnica).
3. Colocación de la pila de troncos. Se colocan horizontalmente encima del terreno, en la parte posterior de las piquetas. Pueden espaciarse con cuñas de madera o piedras de aproximadamente 7 a 10 cm. Los troncos contiguos de cada fila se fijan uno al otro y a las piquetas de madera con alambre de acero galvanizado.
4. Relleno con áridos y tierra vegetal de obra e implantación de material vegetal vivo. Una vez construida la estructura, se rellena con tierra. Al final se colocan las ramas vivas, estacas vivas, plantas enraizadas, a 50 cm de profundidad como mínimo, compactando la tierra para evitar huecos de aire, y finalmente se siembra. El suelo aportado debe tener suficiente humedad o, en caso contrario, debe ser humedecido para poder asegurar que el material vivo introducido pueda desarrollarse y no se sequen.
5. Eliminación u ocultación de cualquier sobrante o excedente. Eliminación u ocultación de cualquier sobrante o excedente de cables de acero, barras metálicas clavadas en el suelo o troncos de madera, en las áreas de detrás de la parte frontal de la empalizada viva.

7.2.4.5 Control de calidad

Al igual que en otras técnicas, en el caso del material vegetal vivo, concretamente las estacas o varas, la procedencia será de zonas próximas a la obra. En el caso de planta de vivero, se certificará el origen del material que será preferentemente de Bizkaia. En ambos casos, se considera admisible hasta un 30 % de marras o pérdidas durante el primer año.

El director de la obra podrá exigir en cualquier momento la realización de ensayos tanto del material vegetal como de la madera indicados en el epígrafe 8.1. *Control de calidad.*

7.2.4.6 Medición y abono

La empalizada se mide por m² de estructura realizada y en su medición se considerarán incluida la recogida del material vegetal, su suministro y su colocación.

7.2.4.7 Recomendaciones

- Se recomienda la ejecución en parada vegetativa excepto si se emplea arbolado o arbustos en contenedor forestal, pudiendo entonces ejecutarse también en primavera y otoño además del invierno.
- Requiere una buena planificación de recolección de material vivo.
- Requiere mano de obra especializada.
- Se recomienda un mantenimiento mínimo de 2 años. Durante este periodo, sustituir el material vivo que no haya arraigado. Llevar a cabo, si es necesario, una entresaca o una poda al cabo de cuatro años.
- Las estacas o la planta enraizada deben ser lo suficientemente largas como para atravesar la estructura hasta el trasdós y así enraizar. La parte delantera debe sobresalir un par de yemas.
- El enramado debe tener una inclinación inferior a 60° con respecto a la horizontal para permitir el crecimiento de las plantas.
- Los troncos que forman el entramado deben disponerse alternativamente y no uno encima de otro para garantizar una mayor elasticidad y resistencia del propio entramado.
- No debe utilizarse geotextil en la parte posterior de la estructura porque impide el enraizamiento de las plantas; en caso necesario, se utilizará otro tipo de malla que no creen superficies de separación.

7.2.4.8 Propuesta de precio descompuesto

Precio descompuesto de m² de empalizada viva.

m² Empalizada de madera viva					
m² de realización de una empalizada viva de madera, estructura compuesta por troncos longitudinales unidos a troncos horizontales frontales es de madera de conifera (D 20-25cm), fijados entre sí con tambores de acero galvanizado de 300 mm mínimo para madera, anclada en la base con barras de acero corrugado, inserción de estacas de especies arbustivas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa contiguas en cada nivel de troncos y/o de planta enraizada, relleno a cada estrato con tierra de la excavación comprendiendo la excavación para la cimentación, el suministro, el transporte de los troncos a pie de obra, el corte de los mismos, la construcción de la estructura, la preparación y conservación en obra del material vegetal y el relleno de la estructura. Incluido el mantenimiento durante los dos años de periodo de la garantía.					
Código	Unidad	Descripción	Resumen	Precio unitario	Importe
1	Materiales				
	m	Tambores autrosacante con arandela L 300 mm para madera	4,000	1,00 €	4,00 €
	m²	Tanco de madera de conifera descortezada	0,200	42,00 €	8,40 €
	Kg	Acero en barras corrugadas S400S de límite elástico $\geq$ 450 N/mm²	1,000	1,40 €	1,40 €
	m²	Estaca 3-7 cm de diámetro y 50-100 cm longitud	40,000	0,80 €	32,00 €
	m²	Relleno y atendido con tierra propia obra de material	0,500	1,50 €	0,75 €
Subtotal materiales:					46,55 €
2	Equipo y maquinaria				
	h	Carreón 10m3 excavón total $\geq$ grúa 10t	0,200	50,00 €	10,00 €
	h	Retransmisión sobre rasgo de 100 kV	0,200	50,14 €	10,03 €
	h	Dumper 1.5t Autóctonos	0,200	26,30 €	5,26 €
	h	Grupo electrógeno de 20-30kVA	0,200	9,28 €	2,82 €
	h	Motocara	0,100	3,58 €	0,35 €
	h	Máquina taladradora	0,200	4,00 €	0,80 €
Subtotal equipo y maquinaria:					29,36 €
3	Mano de obra				
	h	Capto Obra civil	0,10	24,89 €	2,49 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,40	22,67 €	8,83 €
	h	Peón ordinario construcción	0,80	18,00 €	14,40 €
Subtotal mano de obra:					25,72 €
4	Costes directos complementarios				
	%	Costes directos complementarios	0,02	55,09 €	1,10 €
Coste de mantenimiento decenal 18,87% en los primeros 10 años					102,74 €
			[Costes directos (1+2)+(4)]		102,74 €

Imagen 120. Precio descompuesto de empalizada por m² (2022)

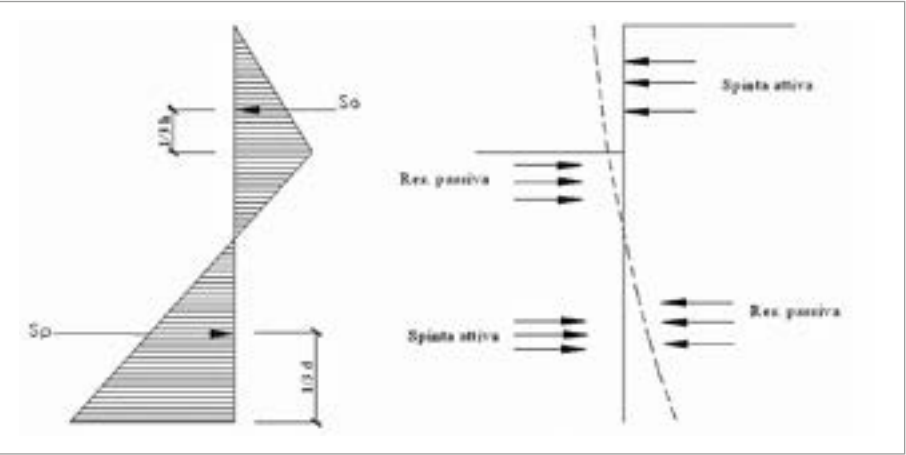


Imagen 121. Esquema de presiones existente en una empalizada de madera

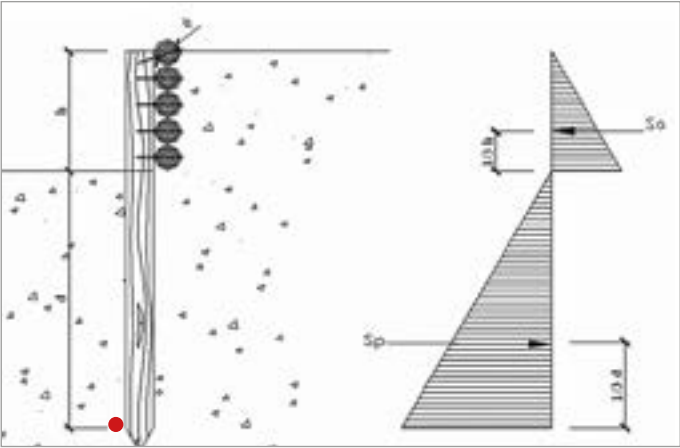


Imagen 122. Esquema simplificado de empujes activos y pasivos. Notación de altura de la empalizada (h) y profundidad de hincado (d). Los momentos se calculan respecto al punto rojo

7.2.4.9 Cálculo empalizada viva de madera

Los parámetros a justificar son los siguientes:

- Profundidad de hincado de las piquetas.
- Distancia intereje entre palos verticales.
- Diámetro de los troncos verticales.
- Diámetro de los palos horizontales.

La estructura está sometida al empuje activo (Sa) ejercida por el terreno. Este empuje genera un efecto de rotación y unas fuerzas de compresión (Sp) en el terreno del trasdós. Se forma, por tanto, un centro de rotación que separa las zonas en las que predominan los empujes activos y los empujes pasivos.

Para el cálculo y dimensionado de una empalizada de madera, se aconseja el uso de las hojas Excel generadas por Menegazzi & Palmeri (2013) que puede ser gratuitamente descargada desde <https://www.aipin.it/pubblizzazioni/>. Para ello se ha de descargar el Excel correspondiente a palizzata (= empalizada en italiano).

A continuación, se muestra una metodología simplificada de cálculo basada en el equilibrio de los momentos generados por los empujes activos y pasivos del terreno. El método consiste en iterar el valor de la profundidad de hincado de los troncos verticales.

Los momentos se calculan respecto al punto de máxima profundidad de hincado de la empalizada (representado con un punto rojo en la anterior imagen).

Para el cálculo de los momentos, el brazo del empuje activo es igual a $d+h/3$. El brazo del empuje pasivo es igual a $d/3$.

$$M_a = S_a \cdot (d+h/3)$$

$$M_p = S_p \cdot d/3$$

El factor de seguridad es igual a M_p/M_a . Si se define un factor de seguridad igual a 1,5, se calculará el valor de profundidad de hincado que satisfaga esa relación.

A continuación, se muestran imágenes de un ejemplo de entrada y salida de datos de dicha aplicación.

Para el cálculo del diámetro mínimo de los troncos horizontales se seguirá la metodología incluida para el caso de los entramados de madera en el epígrafe 7.3.5 Cálculo y comprobaciones de estabilidad de los entramados de madera.

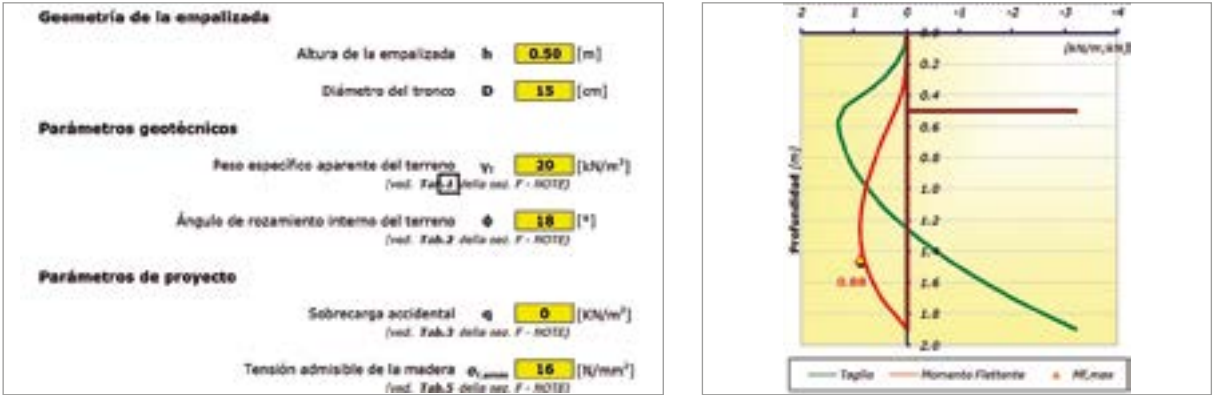


Imagen 123. A la izquierda, entrada de datos. A la derecha, salida de resultados Diagrama de momentos, cortantes y valor de momento máximo

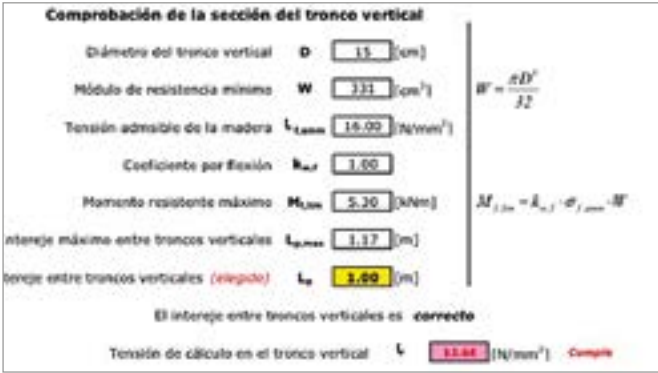


Imagen 124. Salida de datos de la aplicación (distancia intereje entre los troncos verticales)



Imagen 125. Resumen de resultados de la aplicación (incluye el cálculo de la profundidad de hincado necesaria)

7.3 TÉCNICAS MIXTAS

7.3.1 Entramado vivo simple



Imagen 126. Entramado simple

7.3.1.1 Definición y alcance

Es una técnica de estabilización compuesta por una estructura de troncos longitudinales en una sola hilera y troncos transversales que funcionan como anclaje, colocados perpendiculares a la pendiente que se insertan en el fondo del talud. Esta estructura se rellena con tierra, fajas y estacas vivas con el objetivo de que en el futuro el desarrollo de la planta suplante la estructura de troncos. Se utiliza en los casos en los que la contención y protección del terreno son los principales objetivos de la intervención, y hay poco espacio para la excavación.

En función del tipo de terreno el entramado puede estar cimentado o no en piedra. Distinguimos por tanto dos tipos de entramado:

- Entramado de madera en pared simple.
- Entramado de madera en pared simple con cimentación en piedra.

7.3.1.2 Aplicaciones

Esta técnica se emplea con efectividad en los siguientes casos:

- En taludes de nueva construcción con pendiente hasta 50° en carreteras y vías férreas.
- En la estabilización de la base de deslizamientos de hasta tres metros de profundidad.
- En construcción de terraplenes consolidados y con vegetación.
- En ámbito fluvial para la estabilización de márgenes de ríos y lagos.

Los entramados vivos también pueden ser integrados funcionalmente con las estructuras de contención de tipo convencional, encima de escolleras o muros.

Las principales ventajas de esta técnica son:

- El efecto de consolidación inmediato.
- La elasticidad estructural.
- La posible recreación de hábitat natural.
- La buena integración paisajística y medioambiental.

Sigue >>>

Viene de la página anterior >>>

Como desventajas cabe señalar:

- Los entramados vivos simples tienen un límite de altura, no recomendándose que tengan más de 2,5-3 metros de altura.
- El uso de la mano de obra es intenso y la instalación compleja, aunque utilizan menos material que el entramado de madera doble.
- La madera se pudre con el tiempo, por lo que, además de un buen clavado, es necesario que los esquejes insertados en la estructura estén vivos y arraiguen profundamente, para que puedan sustituir la función de sostener y consolidar el talud una vez que la madera haya perdido su función.

7.3.1.3 Materiales

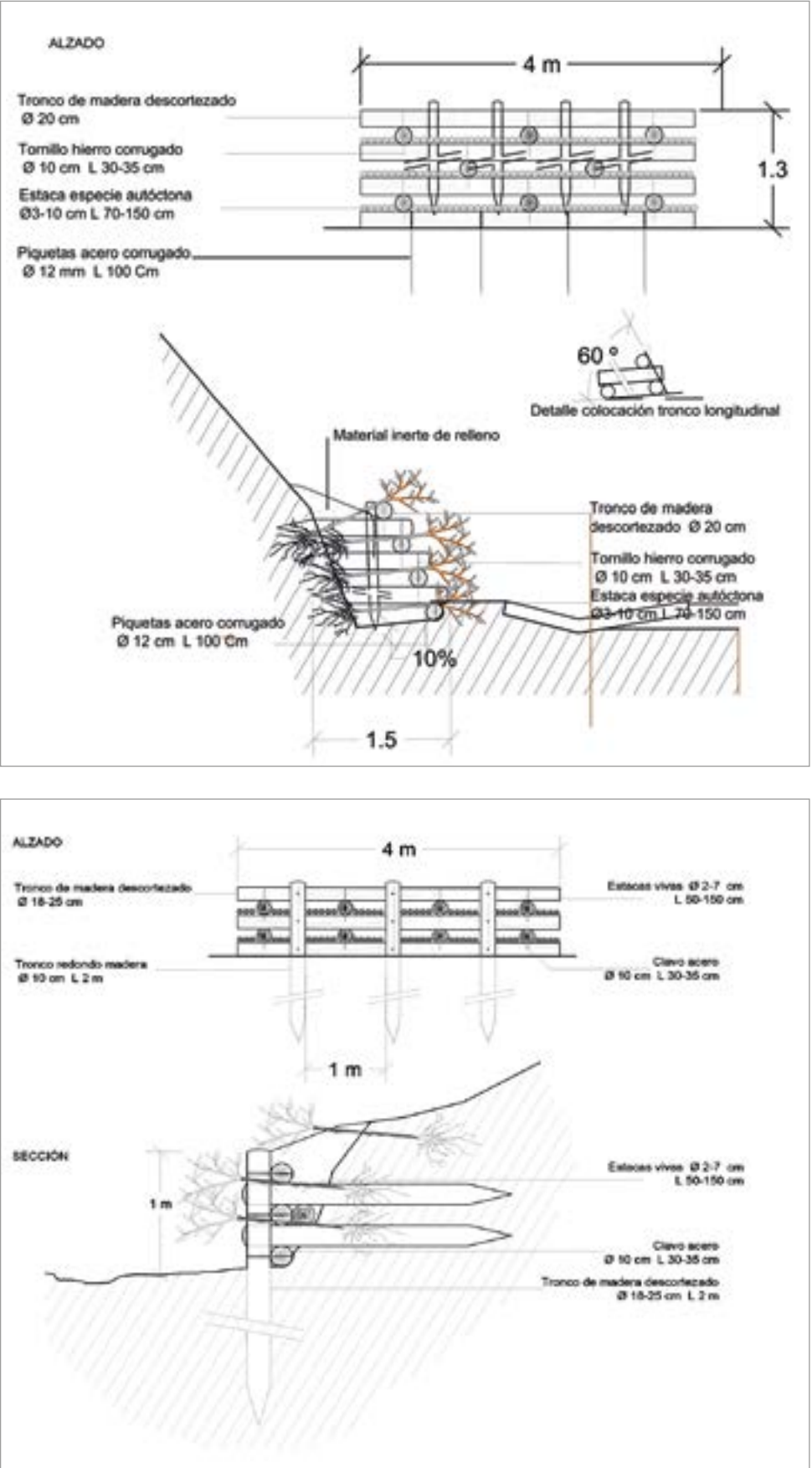
Los materiales necesarios para los entramados vivos dobles.

- Troncos de madera descortezados, de 18 a 25 cm de diámetro y de 2 a 4 m de longitud.
- Clavos de acero galvanizado o tornillos de madera de 10 mm de diámetro y de longitud igual a dos veces el diámetro de los troncos de madera usados.
- Piquetas de acero galvanizado o corrugado, de 12 a 14 mm de diámetro y de 1,50 a 2,50 m de longitud, que se colocan delante de la primera hilera de troncos de la estructura para contrarrestar un posible deslizamiento de esta hacia adelante.
- Estacas vivas de 3-7 cm de diámetro y 50 - 100 cm (10-20 cm mayor a la profundidad de la excavación). En cada hilera se utilizan como mínimo de 10 unidades por metro. Cuando fuera necesario, planta enraizada en alveolo, por ejemplo, en época vegetativa.
- Áridos y tierras de obra.
- Bloques de piedra para la cimentación, si fuera necesario.

7.3.1.4 Ejecución de las obras

1. **Remodelado del talud.** Se procede al saneamiento y remodelado del talud o ladera previo a la implantación de la técnica con equipo mecánico y puntualmente completado con intervenciones manuales.
2. **Excavación de la zona de cimentación.** Se procede a la excavación de una terraza en la base del talud, a una cota inferior a la del nivel del terreno con una altura del diámetro de los troncos previstos en contrapendiente del 10 %. La anchura de la excavación es la suficiente para colocar el tronco horizontal.
3. **Colocación del primer nivel de troncos.** Se coloca el primer nivel de troncos horizontales en una sola hilera. Los troncos horizontales se ensamblan mediante machimbrado y clavos de acero corrugado.
4. Sobre los troncos horizontales se colocan los **troncos transversales** que se anclan al trasdós del terreno. Se colocan a una distancia entre eje de hasta 2 m, siendo preferible una menor distancia en los primeros niveles. Estos troncos se unen a los horizontales mediante barras de acero corrugado de 10-12 mm y 35 cm de longitud.
5. Se clava una nueva hilera de **troncos horizontales**.
6. **Relleno de la estructura con tierra de excavación**, colocando normalmente estacas o planta en contenedor o a raíz desnuda. La tierra se compacta para evitar huecos.
7. **Repetición de las operaciones 4, 5 y 6** la consecución de la altura proyectada de la estructura de contención.
8. **Se remodelan y afianzan los perfiles de la cabecera.** El empleo de geoproductos de ingeniería (mantas de coco, yute...) puede ser útil para proteger los remates laterales y bordes de la estructura.

Imagen 127. Entramado de madera simple y entramado de madera simple con palo frontal. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



9. En zonas con una alta pluviometría y elevado empuje, también es importante colocar **material drenante** en el trasdós en la parte más interna e inferior de la estructura del entramado.

7.3.1.5 Control de calidad

En el caso del material vegetal vivo, concretamente las estacas o varas, la procedencia será de zonas próximas a la obra. En el caso de planta de vivero, se certificará el origen del material que será preferentemente de Bizkaia. En ambos casos, se considera admisible hasta un 30 % de marras o pérdidas durante el primer año.

El Director de la Obra podrá exigir en cualquier momento la realización de cualquiera de los ensayos de material vegetal y de madera indicados en el epígrafe 8.1. *Control de calidad*, en especial en lo relativo a los diámetros de la madera a emplear y su procedencia.

7.3.1.6 Medición y abono

El entramado de madera vivo simple se mide por m² de estructura realizada y en su medición se considerarán incluidas la recogida del material vegetal, su suministro y su colocación.

7.3.1.7 Recomendaciones

- Ejecución en parada vegetativa, excepto si se emplea arbolado o arbustos en contenedor forestal, pudiendo entonces ejecutarse también en primavera y otoño además del invierno.
- Requiere una buena planificación de recolección de material vivo.
- Requiere mano de obra especializada.
- Se recomienda un mantenimiento mínimo de 2 años. Durante este periodo, sustituir el material vivo que no haya arraigado. Llevar a cabo, si necesario, una entresaca o una poda al cabo de cuatro años.
- Las estacas o la planta enraizada deben ser lo suficientemente largas como para atravesar la estructura hasta el trasdós y así enraizar. La parte delantera debe sobresalir un par de yemas.
- El entramado debe tener una inclinación inferior a 60° con respecto a la horizontal para permitir el crecimiento de las plantas.
- Los troncos transversales deben disponerse alternativamente y no uno encima de otro para garantizar una mayor elasticidad y resistencia del propio entramado.
- Debe descartarse el geotextil en la parte posterior de la estructura porque impiden el enraizamiento de las plantas; en caso necesario, se utilizarán otros tipos de mallas que no creen superficies de separación.

7.3.1.8 Propuesta de precio descompuesto: entramado vivo simple

Se establecen dos precios de entramado de madera simple en función del tipo de cimentación (ver imágenes en página siguiente):

- Entramado de madera en pared simple.
- Entramado de madera en pared simple con cimentación en piedra.

7.3.1.9 Cálculo entramado vivo simple

El cálculo del entramado vivo simple se desarrolla en el epígrafe 7.3.5. *Cálculos y comprobaciones de estabilidad de los entramados de madera*.

m³ Entramado de madera pared simple					
m² de realización de un entramado vivo de madera de pared simple, estructura compuesta por troncos longitudinales y transversales de madera de conífera (D 20-25cm), fijados entre sí con tornillos de acero galvanizado de 300 mm mínimo para madera, anclada en la base con barras de acero corrugado, inserción de estacas de especies arbustivas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa contiguas en cada estrato y/o de planta enraizada, relleno a cada estrato con tierra de la excavación comprendiendo la excavación para la cimentación, el suministro, el transporte de los troncos a pie de obra, el corte de los mismos, la construcción de la estructura, la preparación y conservación en obra del material vegetal y el relleno de la estructura. Incluido el mantenimiento durante los dos años de periodo de la garantía.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	MATERIALES				
	u	Tornillo autrosacante con arandela L 300 mm para madera	4,000	1,00 €	4,00 €
	m³	Tanco de madera de conífera descortezada	0,300	42,00 €	12,60 €
	Kg	Acero en barras corrugadas B400S de límite elástico ≥ 400 N/mm²	2,000	1,40 €	2,80 €
	u	Estaca 3-7 cm de diámetro y 50-150 cm longitud	40,000	0,80 €	32,00 €
2	Equipo y maquinaria				
	m³	Relleno y extendido con tierras propia obra de material	0,000	1,50 €	0,90 €
	Subtotal materiales:				52,30 €
	Equipo y maquinaria				
	h	Camión 13m3 tracción total c/ grúa 18t	0,200	50,00 €	10,00 €
3	h	Retroexcavadora sobre orugas de 180 kW	0,200	50,14 €	10,03 €
	h	Dumper 1,5t hidráulico	0,30	26,90 €	8,07 €
	h	Grupo electrógeno de 20-30kVA	0,30	9,39 €	2,82 €
	h	Motosierra	0,100	3,50 €	0,35 €
	h	Máquina taladradora	0,300	4,00 €	1,20 €
4	Mano de obra				
	Subtotal equipo y maquina				32,47 €
	h	Capataz Obra civil	0,20	24,89 €	4,98 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,50	22,07 €	11,04 €
	h	Peón ordinario construcción	1,00	18,00 €	18,00 €
5	Costes directos complementarios				
	Subtotal mano de obra:				34,01 €
	%	Costes directos complementarios	0,02	66,48 €	1,33 €
	Coste de mantenimiento durante los dos años de periodo de la garantía				1,20 €
	Costes directos (1+2+3+4)				120,11 €

Imagen 128. Entramado de madera de pared simple

m³ Entramado de madera pared simple con cimentación en piedra					
m² de realización de un entramado vivo de madera de pared simple, estructura compuesta por troncos longitudinales y transversales de madera de conífera (D 20-25cm), fijados entre sí con tornillos de acero galvanizado de 300 mm mínimo para madera, anclada en la base con barras de acero corrugado, cimentación en piedra, inserción de estacas de especies arbustivas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa contiguas en cada estrato y/o de planta enraizada, relleno a cada estrato con tierra de la excavación comprendiendo la excavación para la cimentación, la colocación de piedra en la base, el suministro, el transporte de la piedra, de los troncos a pie de obra, el corte de los mismos, la construcción de la estructura, la preparación y conservación en obra del material vegetal y el relleno de la estructura. Incluido el mantenimiento durante los dos años de periodo de la garantía.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	Materiales				
	u	Tornillo autrosacante con arandela L 300 mm para madera	4,000	1,00 €	4,00 €
	m³	Tanco de madera de conífera descortezada	0,300	95,10 €	28,50 €
	Kg	Acero en barras corrugadas B400S de límite elástico ≥ 400 N/mm²	2,000	0,80 €	1,60 €
	u	Estaca 3-7 cm de diámetro y 50-150 cm longitud	20,000	0,80 €	16,00 €
2	Equipo y maquinaria				
	m³	Relleno y extendido con tierras propia obra de material seleccionado	0,600	1,50 €	0,90 €
	m³	Piedra para cimentación	0,500	48,10 €	24,00 €
	Subtotal materiales:				75,00 €
	Equipo y maquinaria				
	h	Camión 15m3 tracción total c/ grúa 18t	0,300	50,00 €	15,00 €
3	h	Retroexcavadora sobre orugas de 180 kW	0,300	50,14 €	15,04 €
	h	Dumper 1,5t hidráulico	0,300	26,90 €	8,07 €
	h	Grupo electrógeno de 20-30kVA	0,300	9,39 €	2,82 €
	h	Motosierra	0,100	3,50 €	0,35 €
	h	Máquina taladradora	0,300	4,00 €	1,20 €
4	Mano de obra				
	Subtotal equipo y maquina				42,48 €
	h	Capataz Obra civil	0,05	24,89 €	1,24 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,30	22,07 €	6,62 €
	h	Peón ordinario construcción	0,40	18,00 €	7,20 €
5	Costes directos complementarios				
	Subtotal mano de obra:				15,07 €
	%	Costes directos complementarios	0,02	57,54 €	1,15 €
	Coste de mantenimiento durante los dos años de periodo de la garantía				1,15 €
	Costes directos (1+2+3+4)				133,70 €

Imagen 129. Entramado de madera de pared simple con cimentación en piedra

7.3 TÉCNICAS MIXTAS

7.3.2 Entramado doble o Krainer



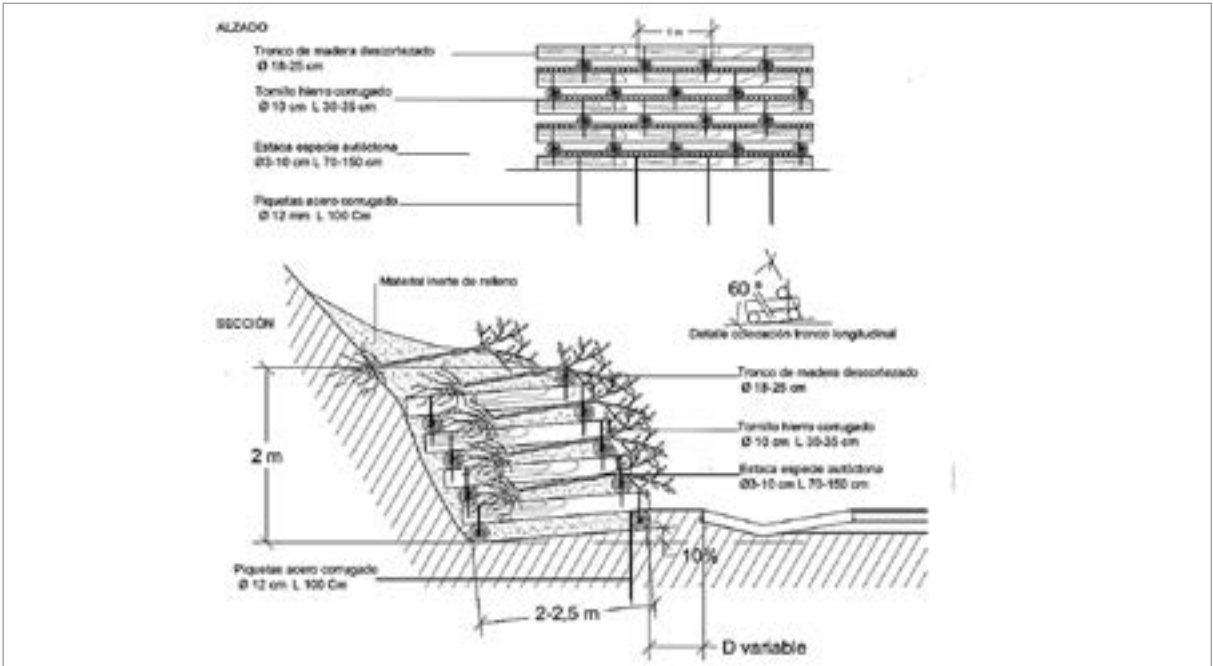
Imagen 130. Entramado de madera doble vivo un año después de su construcción. Fuente: P. Cornolini

7.3.2.1 Definición y alcance

Es una técnica mixta de estabilización formada por una estructura de dos hileras paralelas de troncos descortezados horizontales sobre las que se fijan los troncos transversales, formando un prisma que permite contener tierra. Se introducen especies con características biotécnicas en forma de hileras de estacas o plantas enraizadas con el objetivo de que el futuro desarrollo de la planta suplante la estructura de troncos y estabilice el talud.

Actúa como muro de gravedad, esto es, su masa contrarresta los movimientos desestabilizadores, favoreciendo el drenaje. Está indicado para estabilización de taludes con pendientes de hasta 50 grados, consiguiéndose un refuerzo a una profundidad de 2 a 3 metros. En función de la ubicación y la carga que soporta, puede requerir una cimentación adicional a base de piedra.

Imagen 131. Alzado y perfil de entramado vivo doble tipo Krainer. Fuente: S. Sangalli- SCIA S.L.



7.3.2.2 Aplicaciones

Esta técnica se emplea con efectividad en los siguientes casos:

- En taludes de nueva construcción con una pendiente de hasta 50° en carreteras y vías férreas.
- En la estabilización de la base de deslizamientos de hasta tres metros de profundidad.
- En construcción de terraplenes consolidados y con vegetación.
- En ámbito fluvial para la estabilización de márgenes de ríos y lagos.

Los entramados vivos también pueden ser integrados funcionalmente con las estructuras de contención de tipo convencional, encima de escolleras o muros.

Las principales ventajas de esta técnica son:

- El efecto de consolidación inmediato.
- La elasticidad estructural.
- La posible recreación de hábitat natural.
- La buena integración paisajística y medioambiental.

Como desventajas cabe señalar:

- Los entramados vivos dobles tienen un límite de altura, no recomendándose más de 2,5-3 metros.
- El uso de la mano de obra es intenso y la instalación compleja.
- La madera se pudre con el tiempo, por lo que, además de un buen clavado, es necesario que los esquejes insertados en la estructura estén vivos y arraiguen profundamente, para que puedan sustituir la función de sostener y consolidar el talud una vez que la madera haya perdido su función.

7.3.2.3 Materiales

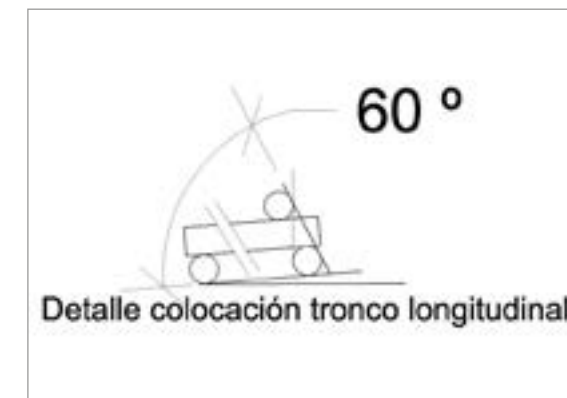
Los materiales necesarios para los entramados vivos con doble tipo Krainer son:

- Troncos de madera descortezados, de 18 a 30 cm de diámetro y de 2 a 4 m de longitud.
- Clavos de acero galvanizado o tornillos de hierro corrugado de 10 mm de diámetro y de longitud igual a dos veces el diámetro de los troncos de madera usados.
- Piquetas de acero galvanizado o corrugado, de 12 a 14 mm de diámetro y de 1,50 a 2,50 m de longitud, que se ponen en frente de la primera línea de la estructura para contrarrestar un posible deslizamiento de ésta hacia adelante.
- Estacas vivas de 3-7 cm de diámetro y 50-100 cm de longitud (10-20 cm mayor a la profundidad de la excavación). En cada hilera se utilizan como mínimo de 10 unidades por metro.
- Planta enraizada en alveolo cuando sea necesario, en periodo vegetativo, por ejemplo.
- Áridos y tierras de obra.
- Bloques de piedra para la cimentación, si fuera necesario.

7.3.2.4 Ejecución de las obras

1. **Remodelado del talud.** Se procede al saneamiento y remodelado del talud o ladera previo a la implantación de la técnica mixta de estabilización con equipo mecánico y puntualmente completado con intervenciones manuales. Para mayor información puede consultarse la *NTJ 12S PARTE 2, apartado 6.3 Preparación del terreno*.

2. **Excavación de la zona de cimentación.** Se procede a la excavación de una terraza en la base del talud, a una cota inferior a la del nivel del terreno con una altura del diámetro de los troncos previstos en contrapendiente del 10%. La anchura de la excavación se corresponde con la de la estructura.
3. **Colocación del primer nivel de troncos.** Se coloca el primer nivel de troncos horizontales formado por dos hileras de troncos paralelos con una distancia de hasta dos metros. Los troncos horizontales se ensamblan mediante machimbrado y clavos de acero corrugado.
4. **Colocación de la primera serie transversal de troncos.** Sobre los troncos horizontales se colocan a una distancia entre ejes de hasta 2 m, siendo preferible una menor distancia en los primeros niveles. Estos troncos se unen a los horizontales mediante barras de acero corrugado de 10-12 mm y 35 cm de longitud.
5. Se clava una nueva hilera de **troncos horizontales**, colocándolo tras la línea vertical imaginaria que se alza desde el nivel de troncos inferior.



6. **Relleno de la estructura con tierra de excavación**, colocando, normalmente fajinas. Otra variante es la colocación de una manta orgánica de coco para evitar el lavado de la tierra y el posterior relleno con tierra de excavación de obra y estacas. La tierra se compacta para evitar huecos.
7. **Repetición de operaciones 4, 5 y 6** la consecución de la altura proyectada de la estructura de contención.
8. **Se remodelan y afianzan los perfiles de la cabecera.** El empleo de geoproductos de ingeniería (mantas de coco, yute...) puede ser útil para proteger los remates laterales y bordes de la estructura aguas arriba, que son los puntos más débiles de cara a la erosión o entrada de agua. También se usan bloques de piedra mayores para disipar la energía en el inicio de las estructuras a modo de deflector.

En zonas con una alta pluviometría y elevado empuje, también es importante colocar **material drenante** en el trasdós, en la parte más interna e inferior de la estructura del entramado.

7.3.2.5 Control de calidad

En el caso del material vegetal vivo, concretamente las estacas o varas, la procedencia será de zonas próximas a la obra. En el caso de planta de vivero, se certificará el origen del material que será preferentemente de Bizkaia. En ambos casos, se considera admisible hasta un 30 % de marras o pérdidas durante el primer año.

Se recomienda la realización de ensayos de material vegetal y de madera como los indicados en el epígrafe 8.1. *Control de calidad*.

7.3.2.6 Medición y abono

El entramado de madera se mide por m³ de estructura realizada y en su medición se considerarán incluidas la recogida del material vegetal, su suministro y su colocación.

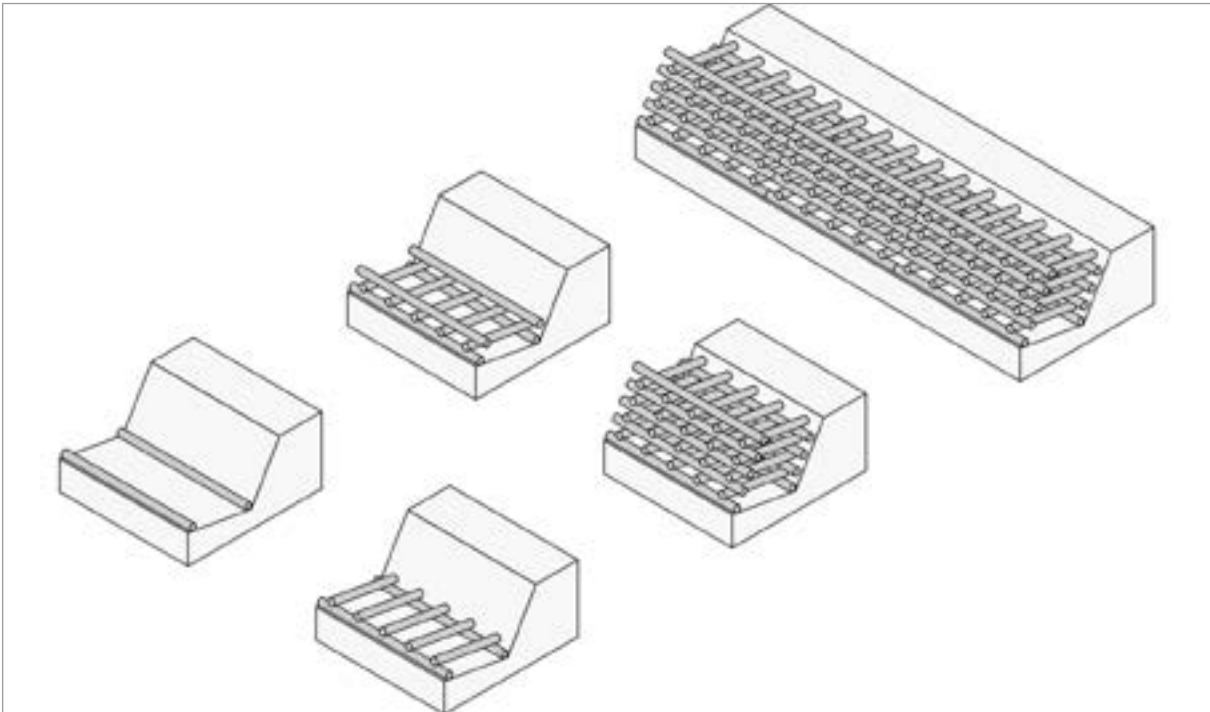


Imagen 132. Fases de ejecución de la estructura de un entramado doble. Durante la ejecución de cada nivel se colocan las estacas y se va relleno de la estructura con tierra. Fuente: S. Sangalli- SCIA S.L.

7.3.2.7 Recomendaciones

- Se recomienda la ejecución en parada vegetativa excepto si se emplea arbolado o arbustos en contenedor forestal, pudiendo entonces ejecutarse también en primavera y otoño además del invierno.
- Se requiere una buena planificación de recolección de material vivo.
- Requiere mano de obra especializada.
- Se recomienda un mantenimiento mínimo de 2 años. Durante este periodo, sustituir el material vivo que no haya arraigado. Llevar a cabo, si necesario, una entresaca o una poda al cabo de cuatro años.
- Las estacas o la planta enraizada deben ser lo suficientemente largos como para atravesar la estructura hasta el trasdós y así enraizar. La parte delantera debe sobresalir solo un par de yemas.
- El entramado debe tener una inclinación inferior a 60° con respecto a la horizontal para permitir el crecimiento de las plantas.
- Los troncos transversales deben disponerse alternativamente, y no uno encima de otro, para garantizar una mayor elasticidad y resistencia del propio entramado.
- No se debe instalar geotextil en la parte posterior de la estructura porque impiden el enraizamiento de las plantas; en caso necesario, se utilizarán otros tipos de mallas que no creen superficies de separación.

7.3.2.8 Propuesta de precio descompuesto: Entramado de madera doble Krainer

Se establecen dos precios de entramado de madera doble tipo Krainer en función de si se trata de:

- Entramado vivo de madera doble tipo Krainer.
- Entramado vivo de madera doble tipo Krainer con cimentación en piedra.

7.3.2.9 Cálculo entramado vivo doble Krainer

El cálculo del entramado vivo doble se desarrolla en el epígrafe 7.3.5 Cálculos y comprobaciones de estabilidad de los entramados de madera.

m ² Entramado vivo de madera doble tipo Krainer					
m ² de realización de un entramado vivo de madera: doble, estructura compuesta por troncos longitudinales y transversales de madera de coníferas (D 20-25cm), fijados entre sí con tornillos de acero galvanizado, anclada en la base con barras de acero corrugado, inserción de estacas de especies arbustivas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa en cada estrato y/o de planta enraizada, relleno a cada estrato con tierra de la excavación comprendiendo la excavación, la cimentación, el suministro, el transporte de los troncos a pie de obra, el corte de los mismos, la construcción de la estructura, la preparación y conservación en obra del material vegetal y el relleno de la estructura. Incluido el mantenimiento durante los dos años de periodo de la garantía.					
Código	Unidad	Descripción	Presupuesto	Entero	Importe
1 Materiales					
1.1	m ²	Tornillo autorroscante con arandela 4,300 mm para madera	0,300	1,00 €	0,30 €
1.2	m ²	Tornillo de madera de coníferas desmontable	0,500	42,00 €	21,00 €
1.3	kg	Acero en barras corrugadas Ø1000 de límite elástico f _{yk} =400	2,000	1,40 €	2,80 €
1.4	m ³	Tronco 3-7 cm de diámetro y 50-100 cm longitud	40,000	0,30 €	12,00 €
1.5	m ²	Relleno y entendido con tierra propia obra de material seleccionado	0,800	1,50 €	1,20 €
Subtotal materiales:					35,30 €
2 Equipo y mano de obra					
2.1	h	Cargador 500 kg tractor total c/ grúa 10t	0,300	60,00 €	18,00 €
2.2	h	Reconstrucción sobre rasgos de 100 kV	0,300	30,00 €	9,00 €
2.3	h	Grupos 1,5 hidráulico	0,300	28,00 €	8,40 €
2.4	h	Grupos eléctricos de 20-30 kV	0,300	8,00 €	2,40 €
2.5	h	Mantenimiento	0,200	3,50 €	0,70 €
2.6	h	Mantenimiento	0,300	4,00 €	1,20 €
Subtotal equipo y mano de obra:					49,70 €
3 Mano de obra					
3.1	h	Cargador 500 kg tractor total c/ grúa 10t	0,300	24,00 €	7,20 €
3.2	h	Grupos 1,5 hidráulico	0,300	22,00 €	6,60 €
3.3	h	Grupos eléctricos de 20-30 kV	0,300	18,00 €	5,40 €
Subtotal mano de obra:					19,20 €
4 Costes directos complementarios					
4.1	%	Costes directos complementarios	0,02	97,33 €	1,95 €
Coste de mantenimiento durante 2 años de periodo de garantía 10 años 1,0 € (1-10 años)				Costes directos (1-10 años)	194,25 €

Imagen 133. Entramado de madera doble tipo Krainer

m ² Entramado vivo de madera doble tipo Krainer con cimentación en piedra					
m ² de realización de un entramado vivo de madera: doble, estructura compuesta por troncos longitudinales y transversales de madera de coníferas (D 20-25cm), fijados entre sí con tornillos de acero galvanizado, anclada en la base con barras de acero corrugado, inserción de estacas de especies arbustivas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa en cada estrato y/o de planta enraizada, relleno a cada estrato con tierra de la excavación comprendiendo la excavación, la cimentación, la colocación de piedra en la base, el suministro y transporte de la piedra, el corte de los troncos a pie de obra, el corte de los mismos, la construcción de la estructura, la preparación y conservación en obra del material vegetal y el relleno de la estructura. Incluido el mantenimiento durante los dos años de periodo de la garantía.					
Código	Unidad	Descripción	Presupuesto	Entero	Importe
1 Materiales					
1.1	m ²	Tornillo autorroscante con arandela 4,300 mm para madera	0,300	1,00 €	0,30 €
1.2	m ²	Tornillo de madera de coníferas desmontable	0,500	42,00 €	21,00 €
1.3	kg	Acero en barras corrugadas Ø1000 de límite elástico f _{yk} =400	2,000	1,40 €	2,80 €
1.4	m ³	Tronco 3-7 cm de diámetro y 50-100 cm longitud	40,000	0,30 €	12,00 €
1.5	m ²	Relleno y entendido con tierra propia obra de material seleccionado	0,800	1,50 €	1,20 €
1.6	m ²	Piedra para cimentación	0,500	48,00 €	24,00 €
Subtotal materiales:					61,30 €
2 Equipo y mano de obra					
2.1	h	Cargador 10m3 tractor total c/ grúa 10t	0,300	60,00 €	18,00 €
2.2	h	Reconstrucción sobre rasgos de 100 kV	0,300	30,00 €	9,00 €
2.3	h	Grupos 1,5 hidráulico	0,300	28,00 €	8,40 €
2.4	h	Grupos eléctricos de 20-30 kV	0,300	8,00 €	2,40 €
2.5	h	Mantenimiento	0,200	3,50 €	0,70 €
2.6	h	Mantenimiento	0,300	4,00 €	1,20 €
Subtotal equipo y mano de obra:					49,70 €
3 Mano de obra					
3.1	h	Cargador 10m3 tractor total c/ grúa 10t	0,300	24,00 €	7,20 €
3.2	h	Grupos 1,5 hidráulico	0,300	22,00 €	6,60 €
3.3	h	Grupos eléctricos de 20-30 kV	0,300	18,00 €	5,40 €
Subtotal mano de obra:					19,20 €
4 Costes directos complementarios					
4.1	%	Costes directos complementarios	0,02	97,33 €	1,95 €
Coste de mantenimiento durante 2 años de periodo de garantía 10 años 1,0 € (1-10 años)				Costes directos (1-10 años)	187,80 €

Imagen 134. Entramado de madera doble tipo Krainer con cimentación en piedra

7.3 TÉCNICAS MIXTAS

7.3.3 Entramado vivo Latina



Imagen 135. Ejemplo de entramado vivo latina en ejecución y tras unos meses. Fuente: P. Cornolini

7.3.3.1 Definición y alcance

Es una técnica mixta de estabilización compuesta por una estructura de madera y tierra, formada por un armazón triangular de troncos que soporta la cara frontal de la cuña de tierra y forma cámaras en las que se insertan esquejes de sauce y/o arbustos autóctonos enraizados. La obra mixta suelo-madera-plantas, funciona como una obra de gravedad.

7.3.3.2 Aplicaciones

Esta técnica se emplea con efectividad en los siguientes casos:

- En taludes de nueva construcción pendiente hasta 50° en carreteras y vías férreas.
- En la estabilización de la base de deslizamientos de hasta tres metros de profundidad.
- En la construcción de terraplenes consolidados y con vegetación.

Las principales ventajas de esta técnica son:

- El efecto de consolidación inmediato.
- En comparación con el entramado vivo de madera doble, ahorra materiales (madera y clavos) y tiempo de construcción.
- Posible recreación de hábitat natural.
- Buena integración paisajística y medioambiental.

Como desventajas cabe señalar:

- Altura limitada. Debido a su construcción especial, el entramado latino tiene un rango de construcción óptimo para alturas de 1,8 a 2,2 m.
- El uso de la mano de obra es intenso y la instalación compleja.
- La madera se pudre con el tiempo, por lo que, además de un buen clavado, es necesario que los esquejes insertados en la estructura estén vivos y arraiguen profundamente, para que puedan sustituir la función de sostener y consolidar el talud una vez que la madera haya perdido su función.

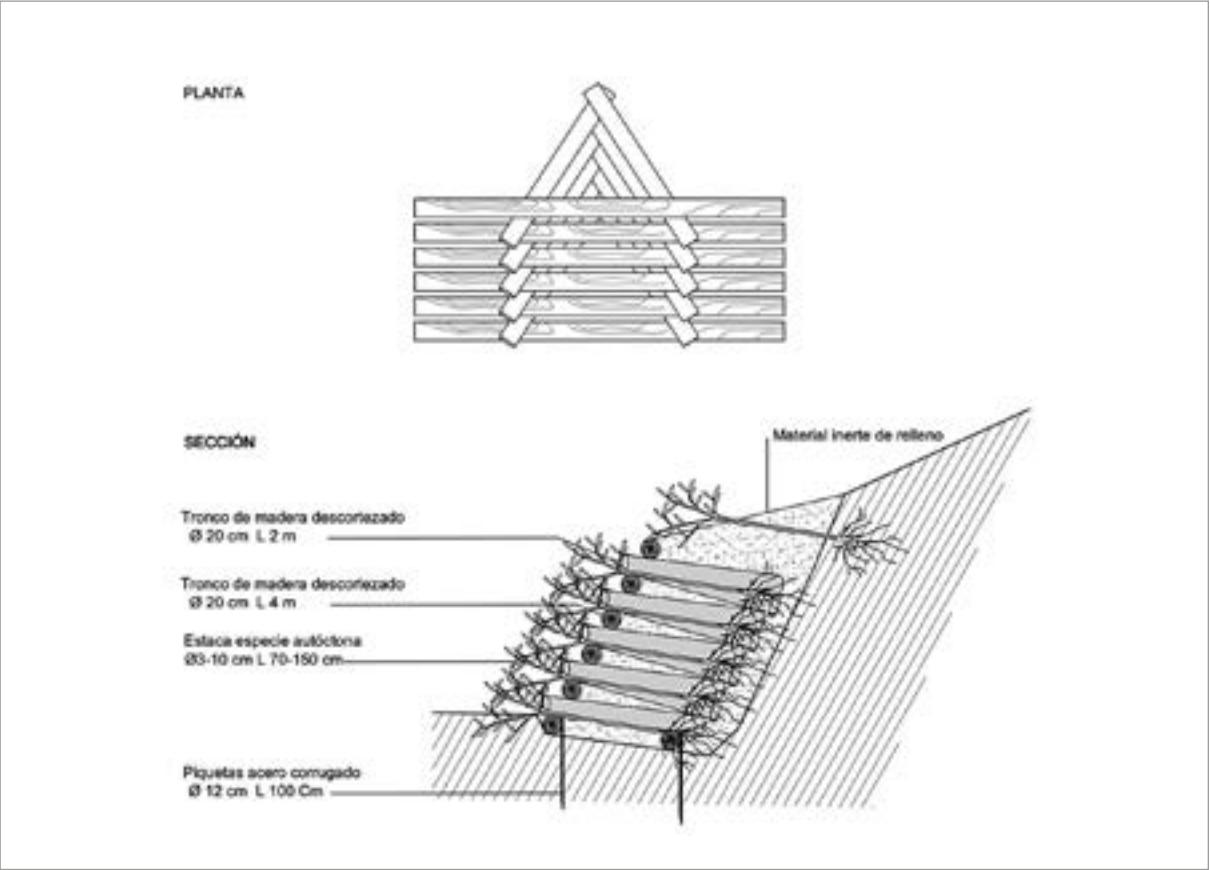
7.3.3.3 Materiales

- Troncos de madera descortezados, de 18 -22 cm de diámetro y de 2 a 4 m de longitud.
- Tornillos acero galvanizado, de 10-12 mm de diámetro y de longitud igual a dos veces el diámetro de los troncos de madera usados, o clavos de acero corrugado de las mismas dimensiones.
- Estacas vivas de 3-7 cm de diámetro y 50-150 cm de longitud. En cada hilera se utilizan como mínimo 10 unidades por metro.
- Arbustos con raíces autóctonas, preferiblemente con capacidad de emitir raíces adventicias desde el tallo.
- Tierra de excavación.

7.3.3.4 Ejecución de las obras

1. **Excavación de la cimentación.** Para una mayor estabilidad, el entramado se enterrará con una contrapendiente de aproximadamente 10° y el frente tendrá una inclinación de 60°. Así se garantiza un mejor crecimiento de las plantas.
2. **Colocación en paralelo de dos filas de troncos.** Los troncos serán de una longitud de 4 m y de 18-22 cm de diámetro, colocados longitudinalmente. Separados por la distancia calculada de cimentación.
3. **Colocación de la primera serie de troncos transversales.** Su longitud será función de la altura de la estructura —2-2,5 m—. Se colocarán por encima de los troncos horizontales y clavados a ellos, formando un cajón horizontal de madera, y unidos entre sí y al tronco horizontal único posterior. Se colocan a 2 m entre sí, formando un triángulo isósceles que se fija en la parte inferior a la viga posterior de la estructura.

Imagen 136. Perfil entramado vivo Latina. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



- 4. *Colocación del siguiente tronco horizontal* clavándolo sobre los dos transversales.
- 5. *Colocación de la segunda serie de troncos transversales.* Se colocan sobre el primer nivel de troncos horizontales que se clavan en la parte posterior entre ellas; y al nivel anterior.
- 6. *Se repiten los puntos 4 y 5* hasta alcanzar la altura calculada.
- 7. *Se rellena con tierra de excavación y tierra vegetal.* El material aportado se compacta y en los huecos entre los niveles horizontales se colocan estacas de especies autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa. Las ramas y plantas no deben sobresalir más de 10 cm del frente, y los esquejes deben llegar hasta el suelo natural.

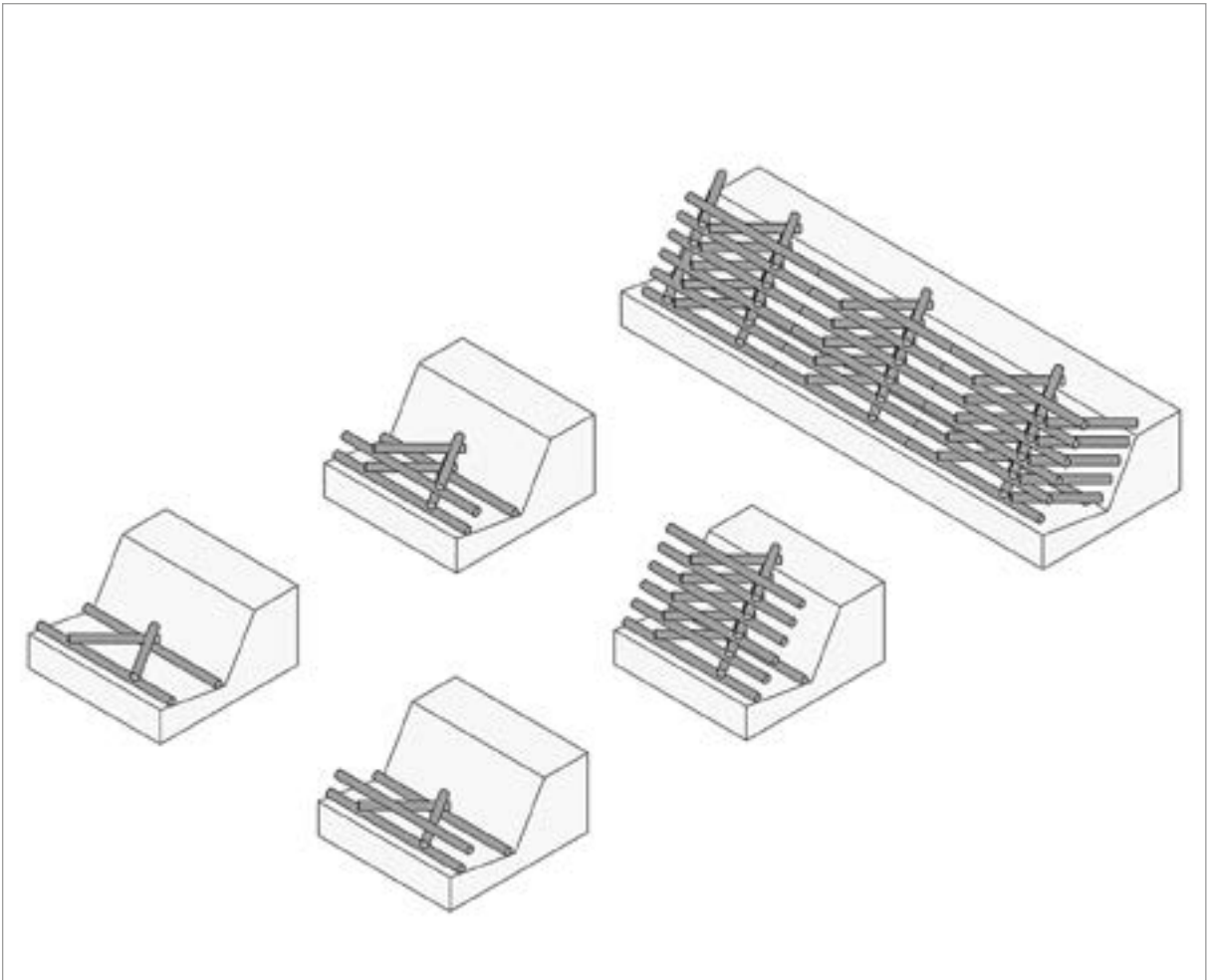
7.3.3.5 Control de calidad

El material vegetal vivo, concretamente las estacas o varas, procederá de zonas próximas a la obra. En el caso de planta de vivero, se certificará el origen del material que será preferentemente de Bizkaia. Se considera admisible hasta un 30 % de marras o pérdidas durante el primer año. Se recomienda la realización de ensayos de material vegetal y de madera indicados en el epígrafe 8.1. *Control de calidad.*

7.3.3.6 Medición y abono

El entramado de madera se mide por m³ de estructura realizada y en su medición se considerarán incluidas la recogida del material vegetal, su suministro y su colocación.

Imagen 137. Fases de construcción entramado-latina. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



7.3.3.7 Recomendaciones

- Ejecución en parada vegetativa. Si se empleara arbolado o arbustos en contenedor forestal, se podría ejecutar también en primavera y otoño además del invierno.
- Requiere una buena planificación de recolección de material vivo.
- Requiere mano de obra especializada.
- Mantenimiento mínimo de 2 años. Durante este periodo se debe sustituir el material vivo que no haya arraigado. Llevar a cabo, si necesario, una entresaca o una poda al cabo de cuatro años.
- Las estacas, o la planta enraizada, deben ser lo suficientemente largas para atravesar la estructura hasta el trasdós y así enraizar. La parte delantera debe sobresalir solo un par de yemas.
- El entramado debe tener una inclinación inferior a 60° con respecto a la horizontal para permitir el crecimiento de las plantas.
- Los troncos transversales se colocan en la misma vertical.
- Debe descartarse instalación de geotextil en la parte posterior de la estructura, porque impiden el enraizamiento de las plantas; en caso necesario, se utilizarán otros tipos de mallas que no creen superficies de separación.

7.3.3.8 Propuesta de precio descompuesto: entramado vivo Latina

A continuación, el precio descompuesto del entramado vivo Latina con o sin cimentación en piedra.

m³ Entramado de madera Latina					
m³ de realización de un entramado vivo de madera tipo latina, estructura compuesta por un amazón triangular de troncos longitudinales y transversales de madera de conifera (D 20-25cm), fijados entre si con tornillos de acero galvanizado, anclada en la base con barras de acero corrugado, inserción de estacas de especies arbustivas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa contiguas en cada estrato y/o de planta enraizada, relleno a cada estrato con tierra de la excavación. Comprende: la excavación para la cimentación, el suministro, el transporte de los troncos a pie de obra, el corte de los mismos, la construcción de la estructura, la preparación y conservación en obra del material vegetal y el relleno de la estructura. Incluido el mantenimiento durante los dos años de periodo de la garantía.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	Materiales				
	u	Tornillo autrosicante con arandela L 300 mm para madera	6.000	1,00 €	6,00 €
	m³	Tonco de madera de conifera descortezada	0,300	42,00 €	12,60 €
	Kg	Alero en barras corrugadas B4006 de límite elástico >=400 N/mm²	2,000	1,40 €	2,80 €
	ud	Estaca 3-7 cm de diámetro y 50-100 cm longitud	40,000	0,80 €	32,00 €
	m³	Relleno y extendido con tierras propia obra de material seleccionado	0,600	1,50 €	0,90 €
Subtotal materiales:					54,30 €
2	Equipo y maquinaria				
	h	Camión 10m3 tracción total c/ grúa 16t	0,300	50,00 €	15,00 €
	h	Retractoradora sobre orugas de 180 cv	0,300	50,14 €	15,04 €
	h	Climper 1,5t hidráulico	0,300	26,90 €	8,07 €
	h	Grupo electrógeno de 20-30kVA	0,300	9,30 €	2,82 €
	h	Introsistema	0,200	3,50 €	0,70 €
	h	Máquina taladradora	0,300	4,00 €	1,20 €
Subtotal equipo y maquina					42,83 €
3	Mano de obra				
	h	Capataz Odra culi	0,20	24,89 €	4,98 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra culi	0,50	22,07 €	11,04 €
	h	Peón ordinario construcción	1,00	18,00 €	18,00 €
Subtotal mano de obra:					34,01 €
4	Costes directos complementarios				
	Nº	Costes directos complementarios	0,02	76,84 €	1,54 €
Coste de mantenimiento decenal: 38 € en los primeros 10 años 3,8 € (m³) y año					Costes directos (1+2+3+4):
					132,68 €

Imagen 138. Entramado de madera Latina

m³ Entramado de madera latina con cimentación en piedra					
m³ de realización de un entramado vivo de madera tipo latina, estructura compuesta por un armazón triangular de troncos longitudinales y transversales de madera de conífera (D 20-25cm), fijados entre sí con tornillos de acero galvanizado, anclada en la base con barras de acero corrugado, cimentación en piedra, inserción de estacas de especies arbustivas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa contiguas en cada estrato y/o de planta enraizada, relleno a cada estrato con tierra de la excavación. Comprende la excavación para la cimentación, colocación de la piedra en la base, el suministro, el transporte de la piedra, de los troncos a pie de obra, el corte de los mismos, la construcción de la estructura, la preparación y conservación en obra del material vegetal y el relleno de la estructura. Incluido el mantenimiento durante los dos años de periodo de la garantía.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento unitario	Precio unitario	Importe
1					
Materiales					
	u	Tornillo autoroscaete con arandela L 360 mm para madera	6,000	1,00 €	6,00 €
	m³	Tronco de madera de conífera descortezada	0,300	42,00 €	12,60 €
	Kg	Acero en barras corrugadas S-400S de límite elástico $\geq$ 400 N/mm²	2,000	1,40 €	2,80 €
	ud	Estaca 3-7 cm de diámetro y 50-100 cm longitud	40,000	0,80 €	32,00 €
	m²	Relleno y extendido con tierras propia obra de material seleccionado	0,500	1,50 €	0,90 €
	m³	Piedra para cimentación	0,500	48,00 €	24,00 €
Subtotal materiales:					78,30 €
2					
Equipo y maquinaria					
	h	Camión 10m³ tracción total c/ grúa 10t	0,300	50,00 €	15,00 €
	h	Retroexcavadora sobre orugas de 180 kW	0,300	50,14 €	15,04 €
	h	Cúmpel 1,5t hidráulico	0,300	26,90 €	8,07 €
	h	Grupo eléctrico de 20-30kVA	0,300	9,30 €	2,82 €
	h	Motosierra	0,200	3,50 €	0,70 €
	h	Máquina taladradora	0,300	4,00 €	1,20 €
Subtotal equipo y maquinaria					42,83 €
3					
Mano de obra					
	h	Capataz Obra civil	0,20	24,80 €	4,96 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,50	22,07 €	11,04 €
	h	Peón ordinario construcción	1,00	18,00 €	18,00 €
Subtotal mano de obra:					34,01 €
4					
Costes directos complementarios					
	%	Costes directos complementarios	0,07	76,84 €	1,54 €
Coste de mantenimiento decimal: 33 € en los primeros 10 años 3,8 € (m³) x 4m³					15,52 €
Costes directos (1+2+3+4)					156,68 €

Imagen 139. Entramado de madera Latina con cimentación en piedra

7.3.3.9 Cálculo entramado vivo Latina

El cálculo del entramado vivo latina se desarrolla en el epígrafe 7.3.5. Cálculos y comprobaciones de estabilidad de los entramados de madera.

7.3 TÉCNICAS MIXTAS

7.3.4 Entramado Aquila



Imagen 140. Imagen Entramado Aquila en construcción. Fuente: P. Cornolini

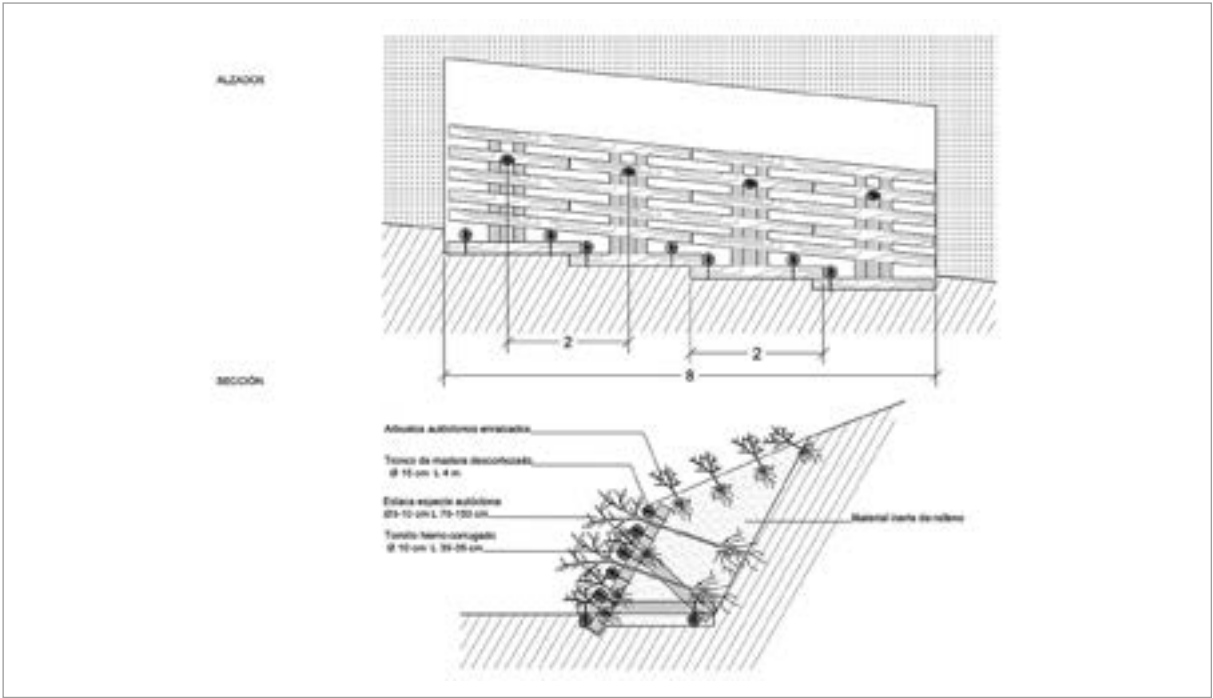
7.3.4.1 Definición y alcance

Es un entramado que se utiliza en caso de carreteras en pendiente.

Técnica indicada para la estabilización de taludes en carreteras en pendiente. Consiste en una estructura de madera y tierra compuesta por módulos formados por dos troncos verticales con un ángulo de 60° y un tirante fijado a los troncos longitudinales que sirven de cimentación, situados en la parte delantera. Los troncos longitudinales de la cimentación deben enterrarse en una excavación equivalente a su diámetro en ligera contrapendiente.

El entramado se construirá en secciones modulares con troncos horizontales de 4 m, con una altura de 2 m. La cimentación, de 2 m de longitud, se va escalonado solapándose 20 cm.

Imagen 141. Alzado y perfil de entramado Aquila. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



7.3.4.2 Aplicaciones

Esta técnica se emplea con efectividad en la estabilización de la base de taludes inestables de carreteras en pendiente.

Al igual que otros entramados, las principales ventajas de esta técnica son:

- El efecto de consolidación inmediato.
- La posible recreación de hábitat natural.
- La buena integración paisajística y medioambiental.

Como desventajas cabe señalar:

- Limitación de la altura de construcción a 1,8 a 2,2 m.
- El uso de la mano de obra es intenso y la instalación compleja.
- La madera se pudre con el tiempo, por lo que, además de un buen clavado, es necesario que los esquejes insertados en la estructura estén vivos y arraiguen profundamente, para que puedan sustituir la función de sostener y consolidar el talud una vez que la madera haya perdido su función.

7.3.4.3 Materiales

- Troncos de madera descortezados, de 18-22 cm de diámetro y de 2 a 4 m de longitud.
- Tornillos acero galvanizado, de 10-12 mm de diámetro y de longitud igual a dos veces el diámetro de los troncos de madera usados o clavos de acero corrugado de las mismas dimensiones.
- Estacas vivas de 3-7 cm de diámetro y 50-150 cm. En cada hilera se utilizan como mínimo 10 unidades por metro.
- Arbustos autóctonos, preferiblemente con capacidad de emitir raíces adventicias desde el tallo.
- Tierra de excavación.

7.3.4.4 Ejecución de las obras

1. **Excavación de la cimentación**, con el fin de reducir la excavación y la cimentación en escalones horizontales de 2 m de longitud con una profundidad equivalente al diámetro del tronco horizontal.
2. **Colocación de dos hileras de troncos horizontales** con un solape entre ellos de 20 cm.
3. **Colocación de los troncos transversales**, se colocarán a unos 20 cm del borde exterior del tronco de cimentación, con una distancia entre ellos de 1,20 m, si estos tienen 20 cm de diámetro.
4. **El primer tramo se coloca** con una longitud ligeramente superior a 4 m para mantener un saliente de 4 m. Este tramo se ubicará en las transversales primera y tercera, siguiendo una pendiente paralela a la carretera (consulte el alzado frontal).
5. **Colocación de dos troncos verticales con una inclinación de 60 grados y un tirante**. Los troncos verticales se insertan en el suelo y se clavan al tronco longitudinal de la cimentación delantera. Estos troncos, montantes, estarán articulados al tronco que hace de tirante, éste a su vez estará clavado al tronco horizontal de la cimentación trasera al objeto de formar marcos triangulares situados a 2 m entre centros (Ver sección/alzado frontal).
6. **Fijación de troncos horizontales paralelos al de cimentación**. Una vez creados los triángulos, se procede a realizar dicha fijación, dando lugar a una estructura paralela a la pendiente de la carretera.

7. **Colocación de troncos transversales sobre el segundo nivel de tronco horizontal**. Se clavarán en la parte posterior, entre ellas y al nivel anterior.
8. **Se rellenarán las capas con tierra de excavación, tierra vegetal y compactación**. En los huecos entre los niveles horizontales se colocan estacas de especies autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa. Las ramas y plantas no deben sobresalir más de 10-20 cm del frente, y los esquejes deben llegar hasta el suelo natural.

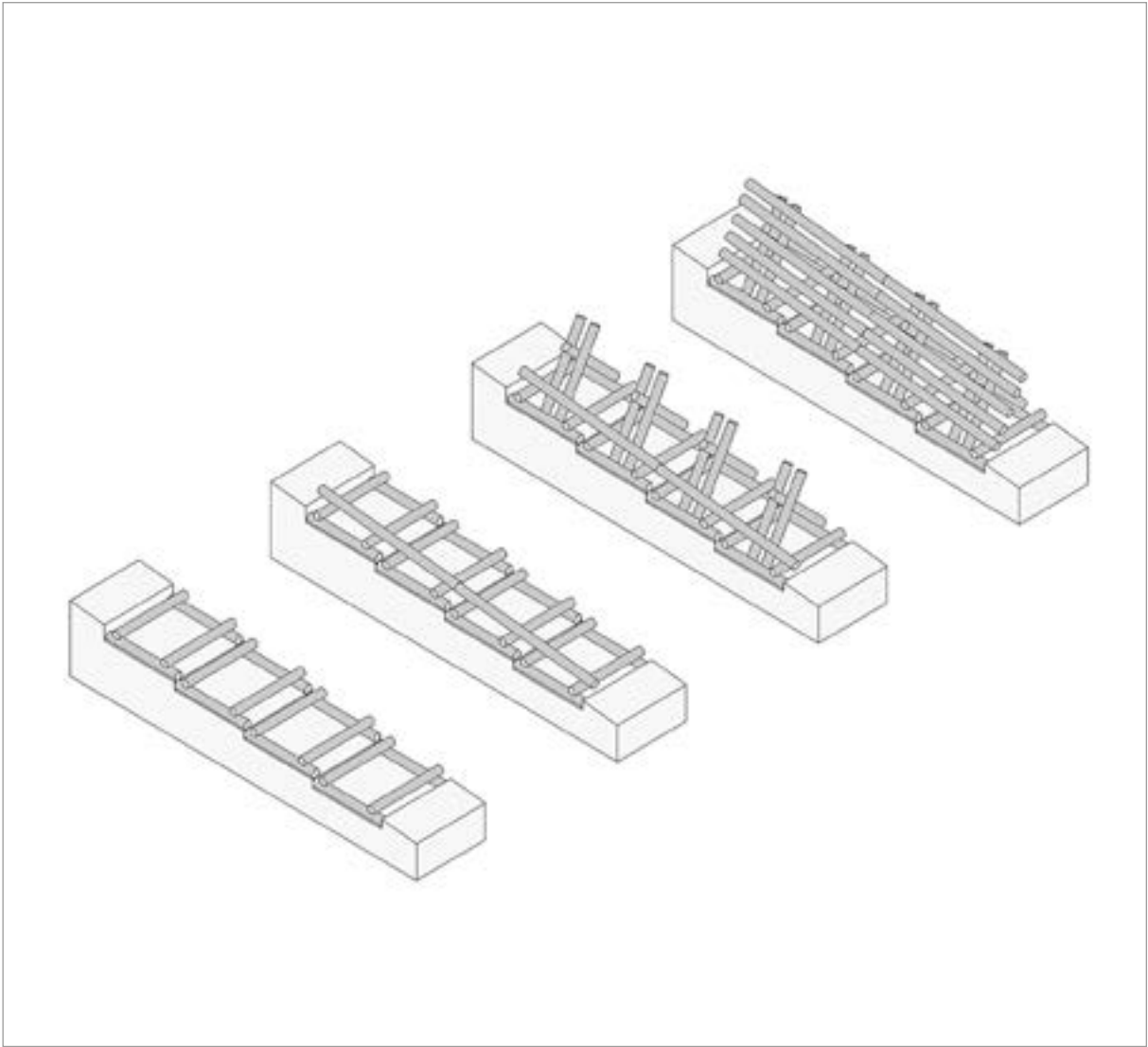
7.3.4.5 Control de calidad

En el caso de planta de vivero, se certificará el origen del material que será preferentemente de Bizkaia, de zonas próxima a la obra, siendo admisible hasta un 30 % de marras o pérdidas durante el primer año. Se recomienda la realización de ensayos de material vegetal y de madera indicados en el epígrafe 8.1. Control de calidad.

7.3.4.6 Medición y abono

El entramado de madera se mide por m3 de estructura realizada y en su medición se considerarán incluidas la recogida del material vegetal, su suministro y su colocación.

Imagen 142. Etapas de construcción de la estructura. Durante la ejecución se colocan las estacas en cada nivel y se va rellenando la estructura con tierra. Fuente: S. Sangalli-SCIA S.L.



7.3.4.7 Recomendaciones

- Se recomienda la ejecución en parada vegetativa excepto si se emplea arbolado o arbustos en contenedor forestal, pudiendo entonces ejecutarse también en primavera y otoño además del invierno.
- Se requiere una buena planificación de recolección de material vivo.
- Requiere mano de obra especializada.
- Se recomienda un mantenimiento mínimo de 2 años. Durante este periodo, sustituir el material vivo que no haya arraigado. Llevar a cabo, si necesario, una entresaca o una poda al cabo de cuatro años.
- Las estacas o la planta enraizada deben ser lo suficientemente largos como para atravesar la estructura hasta el trasdós y así enraizar, mientras que la parte delantera debe sobresalir solo un par de yemas.
- La inclinación frontal de la estructura no debe superar los 60°.
- Debe establecerse una pendiente de los troncos horizontales paralela a la carretera.
- Los marcos triangulares deben cuidarse bien.
- Para facilitar la aplicación, el relleno con tierra y plantas debe hacerse en capas.
- Deben descartarse el geotextil en la parte posterior de la estructura porque impiden el enraizamiento de las plantas; en caso necesario, se utilizarán otros tipos de mallas que no creen superficies de separación.

7.3.4.8 Propuesta de precio descompuesto: entramado de madera Aquila

Se establecen dos precios en función del tipo de cimentación empleada (ver imágenes en la página siguiente).

7.3.4.9 Cálculo entramado vivo Aquila

El cálculo del entramado vivo Aquila se desarrolla en el epígrafe 7.3.5 Cálculos y comprobaciones de estabilidad de los entramados de madera.

m ³ Entramado de madera Aquila					
m ³ de realización de un entramado vivo de madera tipo Aquila, estructura compuesta por una estructura de madera y tierra formada por marcos triangulares formados por dos troncos de madera de conífera descortezada (D 20-25cm) verticales y un traste fijado al tronco delantero y trasero de la cimentación, fijados entre si con tornillos de acero galvanizado, anclado en la base con barras de acero corrugado, inserción de estacas de especies arbustivas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa cortiguas en cada estrato y/o de planta enraizada, relleno a cada estrato con tierra de la excavación. Comprende la excavación para la cimentación, el suministro, el transporte de los troncos a pie de obra, el corte de los mismos, la construcción de la estructura, la preparación y conservación en obra del material vegetal y el relleno de la estructura. Incluido el mantenimiento durante los dos años de periodo de la garantía.					
Códigos	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	Materiales				
	u	Tornillo autrosicante con arandela L. 300 mm para madera	6,000	1,00 €	6,00 €
	m ³	Tonco de madera de conifera descortezada	6,200	42,00 €	12,60 €
	Kg	Acero en barras corrugadas B400E de límite elástico >=400 N/mm ²	2,000	1,40 €	2,80 €
	ud	Estaca 3-7 cm de diámetro y 50-100 cm longitud	40,000	0,80 €	32,00 €
	m ³	Relleno y extendido con tierras propia obra de material seleccionado	6,000	1,50 €	9,00 €
Subtotal materiales:					54,26 €
2	Equipo y maquinaria				
	h	Camión 10m3 tracción total ej. grúa 10t	0,300	50,00 €	15,00 €
	h	Retractoradora sobre orugas de 180 CV	0,300	50,14 €	15,04 €
	h	Dumper 1,5hidráulico	0,300	26,90 €	8,07 €
	h	Grupo eléctrico de 20-30kVA	0,300	9,39 €	2,82 €
	h	Motosierra	0,200	3,50 €	0,70 €
	h	Máquina taladradora	0,300	4,00 €	1,20 €
Subtotal equipo y maquinaria:					42,83 €
3	Mano de obra				
	h	Capataz Obra civil	0,20	24,89 €	4,98 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,70	22,07 €	15,45 €
	h	Peón ordinario construcción	1,50	18,00 €	27,00 €
Subtotal mano de obra:					47,43 €
4	Costes directos complementarios				
	%	Costes directos complementarios	0,02	90,26 €	1,81 €
Coste de mantenimiento anual: 38 € en los primeros 10 años 3,8 €/m ³ y año			Costes directos (1+2+3+4):		146,26 €

Imagen 143. Entramado de madera Aquila

m ³ Entramado de madera Aquila con cimentación en piedra					
m ³ de realización de un entramado vivo de madera tipo Aquila, estructura compuesta por una estructura de madera y tierra formada por marcos triangulares formados por dos troncos de madera de conifera descortezada (D 20-25cm) verticales y un traste fijado al tronco delantero y trasero de la cimentación, fijados entre si con tornillos de acero galvanizado, anclado en la base con barras de acero corrugado, cimentación en piedra, inserción de estacas de especies arbustivas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa cortiguas en cada estrato y/o de planta enraizada, relleno a cada estrato con tierra de la excavación. Comprende la excavación para la cimentación, colocación de piedra en la base, el suministro, el transporte de la piedra, de los troncos a pie de obra, el corte de los mismos, la construcción de la estructura, la preparación y conservación en obra del material vegetal y el relleno de la estructura. Incluido el mantenimiento durante los dos años de periodo de la garantía.					
Códigos	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	Materiales				
	u	Tornillo autrosicante con arandela L. 300 mm para madera	6,000	1,00 €	6,00 €
	m ³	Tonco de madera de conifera descortezada	6,200	42,00 €	12,60 €
	Kg	Acero en barras corrugadas B400E de límite elástico >=400 N/mm ²	2,000	1,40 €	2,80 €
	ud	Estaca 3-7 cm de diámetro y 50-100 cm longitud	40,000	0,80 €	32,00 €
	m ³	Relleno y extendido con tierras propia obra de material seleccionado	6,000	1,50 €	9,00 €
2	Equipo y maquinaria				
	h	Camión 10m3 tracción total ej. grúa 10t	0,300	50,00 €	15,00 €
	h	Retractoradora sobre orugas de 180 CV	0,300	50,14 €	15,04 €
	h	Dumper 1,5hidráulico	0,300	26,90 €	8,07 €
	h	Grupo eléctrico de 20-30kVA	0,300	9,39 €	2,82 €
	h	Motosierra	0,200	3,50 €	0,70 €
3	Mano de obra				
	h	Capataz Obra civil	0,20	24,89 €	4,98 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,70	22,07 €	15,45 €
4	Costes directos complementarios				
	%	Costes directos complementarios	0,02	90,26 €	1,81 €
Coste de mantenimiento anual: 38 € en los primeros 10 años 3,8 €/m ³ y año			Costes directos (1+2+3+4):		176,26 €

Imagen 144. Entramado de madera Aquila con cimentación en piedra

7.3 TÉCNICAS MIXTAS

7.3.5 Cálculos y comprobaciones de estabilidad de los entramados de madera

7.3.5.1 Introducción

La comprobación de las estructuras de contención y/o estabilización de laderas incluyen los siguientes aspectos:

- **Comprobación de la estabilidad externa.** Ésta generalmente incluye las comprobaciones de estabilidad frente a deslizamiento, vuelco y capacidad portante del terreno.
- **Comprobación de estabilidad global.** Esta comprobación se suele incluir dentro del anterior grupo y consiste en el análisis de la estabilidad del conjunto ladera y técnica. Se realiza un análisis de estabilidad que incluya los efectos de refuerzo de la técnica empleada.
- **Comprobación de estabilidad interna.** Consiste en la comprobación de las secciones y resistencia de los materiales empleados. En esta comprobación obtenemos los diámetros mínimos de los elementos de madera, la resistencia necesaria de las uniones entre los distintos elementos, el peso mínimo de las rocas de una escollera, la longitud de anclaje de un geotextil o geomalla, realizamos la comprobación a cortante de las jaulas de un entramado de madera, etc.

En estas comprobaciones han de tenerse en cuenta los procesos de deterioro de los materiales utilizados.

7.3.5.2 Comportamiento mecánico de un entramado de madera

Los entramados de madera son considerados estructuras de contención con un comportamiento asimilable a los muros de gravedad. El entramado consiste en troncos horizontales y transversales que crean compartimentos que son rellenos por terreno del lugar y materiales granulares de distintos tamaños.

El diseño de los entramados de madera se basa en la teoría clásica de mecánica del suelo. Esta teoría asume que el entramado se comporta como un cuerpo rígido y, por tanto, para las comprobaciones de estabilidad se le asume un comportamiento monolítico (Brandl, 1987).

En verdad, el comportamiento mecánico real de un entramado de madera es algo distinto. La naturaleza flexible y compartimentada de estas estructuras permite que existan movimientos relativos de unas partes del muro en relación con otras. Por tanto, la configuración de este tipo de muros permite la redistribución de las tensiones en su interior. Esto explica que el tipo de fallo más común de estas estructuras no sea el de vuelco o el de deslizamiento, sino el debido a excesos de deformación local en alguna parte del entramado.

Inicialmente, los entramados de madera se rellenaban exclusivamente con piedras. Esto provocaba que, tras la pudrición y descomposición de la madera, los materiales de relleno se desmoronaran y estuvieran expuestos a los efectos de la erosión y el arrastre de la escorrentía. Por esta razón se empezaron a colocar ramas vivas entre los huecos del entramado. De esta manera se consiguió que la vegetación desempeñara un efecto de consolidación que permitía mantener los materiales de relleno estables tras la descomposición de los troncos de madera del entramado.

Por tanto, a través del refuerzo de las raíces y la biomasa aérea de las plantas, se conseguía el traspaso del papel estabilizador de los troncos a la vegetación (Schiechtl & Bergmann, 1994). En estos nuevos diseños se hacía posible la transición entre las distintas fases de la vida de servicio de la obra de bioingeniería (FASE 1, FASE 2 y FASE 3).

Al conjunto de entramado de madera y el material vegetal vivo (representado en general por ramas vivas) se le denomina entramado vivo de madera. Se trata verdaderamente de una estructura viva que cambia y evoluciona con el tiempo ya que está formada por materiales biodegradables y material vegetal vivo. Esta es la principal diferencia de estas obras frente a otras técnicas de ingeniería tradicional.

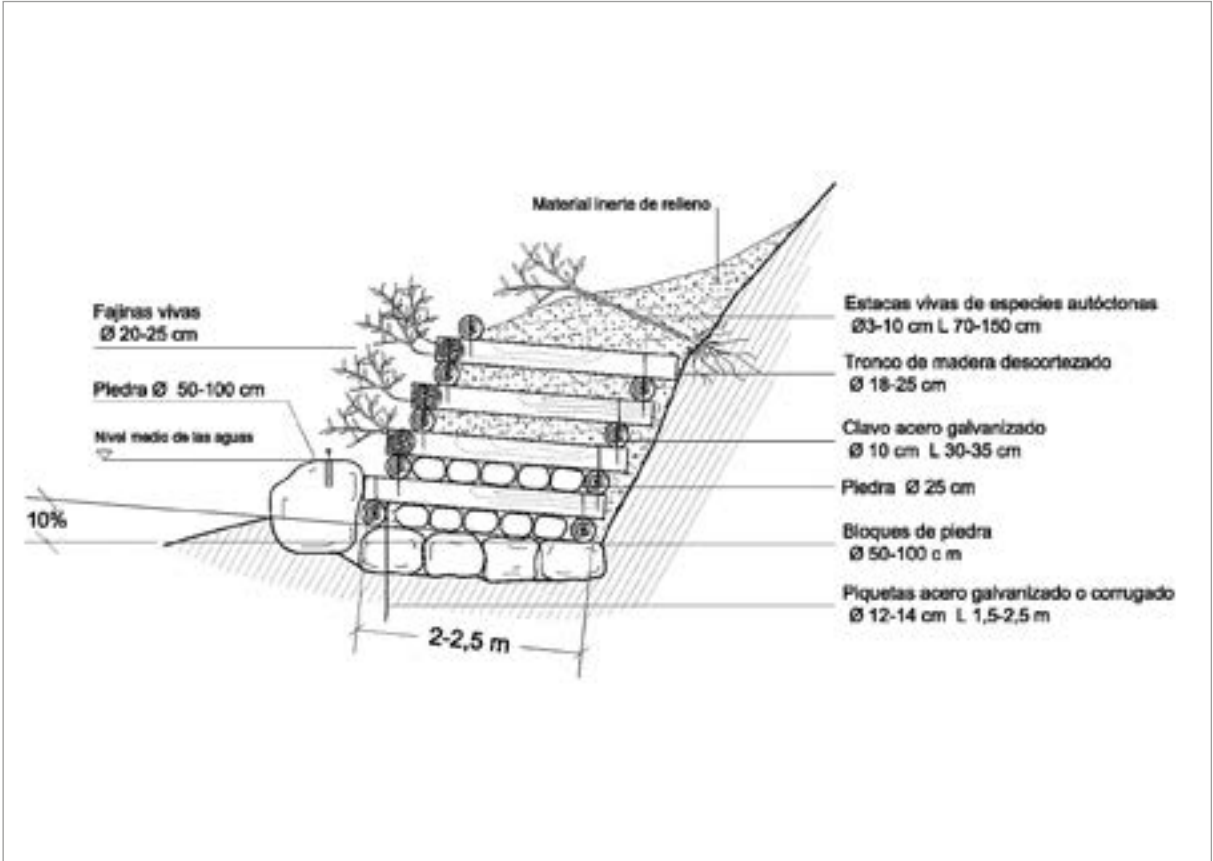


Imagen145. Detalle de entramado de madera de pared doble. Fuente: NTJ 12S Parte 5 / S. Sangalli - SCIA S.L.

Actualmente, el uso de los entramados vivos de madera está cada vez más extendido dado que aporta tanto funciones de soporte, por ser una estructura de contención, como funciones ecológicas y paisajísticas, que no es posible conseguir con otras técnicas de contención de tierras.

Las fuerzas que actúan sobre el paramento interno de un entramado son las siguientes:

- El peso propio del conjunto entramado-relleno.
- El peso del terreno sobre la estructura.
- La resultante del empuje activo sobre la estructura.

Para complementar y evitar redundancias con la bibliografía existente, a continuación, se exponen brevemente los fundamentos e ideas base de las comprobaciones de estabilidad. Se indican en los distintos epígrafes, referencias donde el lector puede completar y profundizar en el estudio de las ideas y conceptos expresados en esta parte del manual.

7.3.5.3 Comprobaciones de estabilidad externa

En general, en la fase de predimensionado, para los entramados de madera se respeta la siguiente regla de la geometría del elemento: $B \geq H/2$. Donde B es la base del entramado y H la altura. Por otro lado, la experiencia acumulada en la construcción de este tipo de elementos indica que es preferible alcanzar la condición de $B = H$.

Por otro lado, dado que el material vegetal vivo (ramas, vivas, estacas vivas, etc.) ha de estar en contacto con el terreno natural existente en la espalda del entramado, la longitud máxima de la base vendrá limitada por la longitud máxima de materia vegetal vivo utilizado. Debido a la anterior limitación, la base de los entramados no debe ser superior a los 2-2,5 m de longitud, lo cual, a su vez, limita la altura del entramado (utilizando las anteriores recomendaciones) de 2,5-3,0 m.

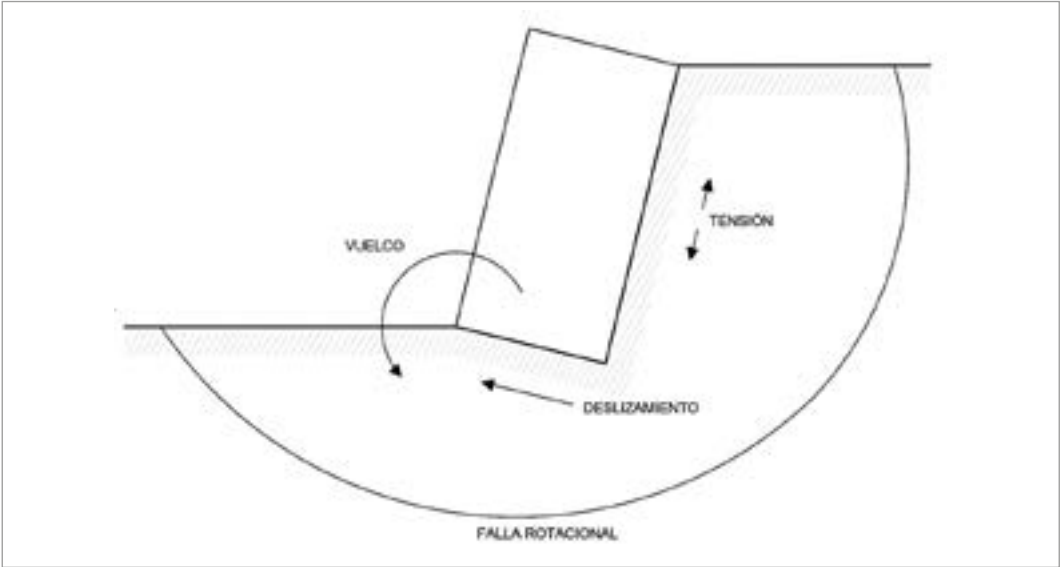


Imagen 146. Modos de fallo a analizar en el caso de un entramado de madera. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.

Para el análisis de estabilidad externa, todas las fuerzas que actúan sobre el entramado deben ser tenidas en cuenta. En particular:

- El peso propio del entramado.
- El empuje activo del terreno.
- Cualquier tipo de fuerza puntual o sobrecarga (cargas debidas al tráfico, presión del agua, cargas procedentes de otras estructuras, etc.).

En el análisis de estabilidad externa se incluyen la comprobación a vuelco, a deslizamiento, de la capacidad portante del terreno y el análisis de la estabilidad global del conjunto ladera-entramado.

En las anteriores comprobaciones se sigue la teoría monolítica, de acuerdo con la cual, el entramado es considerado como un único cuerpo de material compuesto y las cargas son consideradas como fuerzas externas.

En las comprobaciones de estabilidad externa se han de incluir las distintas combinaciones de acciones (permanentes y variables) para el caso de estados límites últimos (ELU).

En relación con los coeficientes de mayoración de las acciones, se pueden utilizar los siguientes valores:

Tabla 13. Basada en la Tabla de 6.2-b de la instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carreteras, IAP-11

Acción		Efecto	
		Favorable	Desfavorable
Permanente	Peso propio	1,0	1,35
	Carga muerta	1,0	1,35
	Empuje de tierras	1,0	1,35
Variable	Sobrecarga de uso	0	1,35
	Sobrecarga de uso en terraplenes	0	1,5

En relación con los coeficientes de minoración aplicables a los parámetros geotécnicos, se puede utilizar los valores de la siguiente tabla.

Tabla 14. Basada en la Tabla A.2 de la Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con Eurocódigo 7: bases del proyecto geotécnico

Parámetro geotécnico	Valor coeficiente
Ángulo de rozamiento interno*	1,25
Cohesión efectiva	1,25
Resistencia corte sin drenaje	1,40
Resistencia compresión simple	1,40
Peso específico	1,00

*Este coeficiente se aplica a tangente (ángulo rozamiento interno).

Se ha de comprobar que:

$$R_d \geq E_d$$

Eq. 1

Donde:

R_d = valor de cálculo de la resistencia del sistema geotécnico.
 E_d = valor de cálculo de las acciones.

La anterior comprobación se realiza cuando se utilicen coeficientes parciales (como los indicados en las anteriores tablas). Los valores de los anteriores coeficientes se fijaron de manera que el resultado del proyecto sea similar al que se obtendría mediante el empleo de coeficientes globales. Es precisamente este enfoque (el de coeficientes globales) el que se aplica en los siguientes epígrafes.

7.3.5.4 Comprobación a vuelco

En el caso de los entramados de madera, esta comprobación no suele ser problemática dado que el centro de gravedad del conjunto suele encontrarse dentro de la mitad interior de su anchura. En general, en esta comprobación se puede considerar un factor de seguridad mínimo igual a 1,5. Este es un valor inferior al considerado para otros tipos de muros de gravedad en los que se considera un valor mínimo de 2 para la comprobación a vuelco. Esto se debe a la experiencia acumulada y a los resultados obtenidos en el análisis y experimentos realizados con los muros tipo jaula (Brandl, 1987).

En este caso, la fuerza desestabilizante es el empuje activo del terreno actuando con un ángulo igual a δ (ángulo de fricción terreno-entramado) y la fuerza resistente es el propio peso del entramado.

El factor de seguridad tiene la siguiente expresión:

$$FS_{vuelco} = \frac{W \cdot \left(\cos \alpha \cdot \frac{B}{2} + \sin \alpha \cdot \frac{H}{2} \right) + P_a \cdot \sin \delta \cdot B}{\left(\left(P_{as} \cdot \frac{H}{2} \right) + \left(P_{aw} \cdot \frac{H}{3} \right) \right) \cdot \cos \delta}$$

Eq. 2

Donde:

W = peso del entramado por metro lineal (kN/m).
 P_a = empuje activo total sobre el entramado
 $(P_a = P_{as} + P_{aw})$ (kN/m).
 P_{as} = empuje activo debido a sobrecargas (kN/m).
 P_{aw} = empuje activo del terreno (kN/m).
 H = altura del entramado (m).
 B = base del entramado (m).

En la siguiente imagen se muestran las variables y ángulos utilizados en la expresión del factor de seguridad.

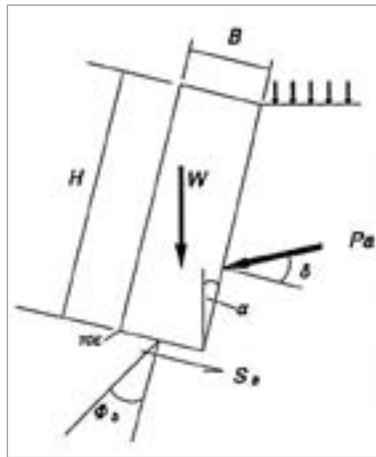


Imagen 147. Símbolos utilizados en la fórmula de estabilidad frente a vuelco.

Los momentos se calculan respecto a la puntera del entramado (adaptado de Bullen et al., 1992)

Comprobación a deslizamiento

En general, se adopta un coeficiente de seguridad mínimo frente al deslizamiento igual a 1,5. El entramado debe ser capaz de resistir las fuerzas resultantes actuando en paralelo a su base. La ecuación que compara las fuerzas estabilizantes y desestabilizantes, en este caso, es la siguiente:

$$FS_{\text{DESPLAZAMIENTO}} = \frac{(W \cdot \cos \alpha + P_e \cdot \sin \delta) \cdot \tan \phi_s}{P_e \cdot \cos \delta - W \cdot \sin \alpha} \quad \text{Eq. 3}$$

Donde:

Φ_s = ángulo de fricción entre la base del entramado y el terreno.

Capacidad portante del terreno. Comprobación al hundimiento

De acuerdo con la teoría monolítica, todas las fuerzas aplicadas sobre el entramado son transmitidas al terreno. Para el cálculo del peso del entramado se utilizará el peso específico medio del conjunto madera-relleno (también se puede calcular el peso del entramado en función del volumen ocupado por los troncos y el relleno respectivamente).

Entonces la presión máxima y mínima existente en la base del entramado son las siguientes:

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{A} \cdot \left(1 \pm \frac{6e}{b'} \right) \quad \text{Eq. 4}$$

Donde:

N = fuerza normal resultante actuando en la base del entramado.

A = área de la base del entramado.

b' = anchura efectiva del entramado.

e = excentricidad de la resultante de fuerzas.

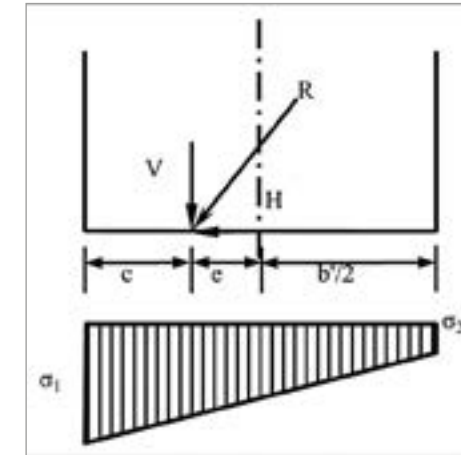


Imagen 148. Diagrama de las fuerzas y presión normal para los cálculos de estabilidad de vuelco y capacidad portante del terreno (adaptado de Acharya, 2018)

La determinación de la capacidad portante del terreno se puede realizar mediante un estudio geotécnico de la zona de intervención. En caso de que lo anterior no sea posible, se pueden utilizar métodos teóricos (por ejemplo, método de Meyerhoff). La división de la máxima capacidad portante del terreno entre la máxima presión ejercida sobre él nos permitirá obtener el valor del factor de seguridad.

Un valor de 1.5 para el factor de seguridad de esta comprobación suele ser suficiente.

7.3.5.5 Comprobación de estabilidad global

En esta comprobación se realiza un análisis de estabilidad del talud o ladera. La estabilidad de la ladera deberá estar asegurada a lo largo de toda la vida de servicio de la obra de bioingeniería. Los taludes se desmoronan debido a la insuficiencia mecánica del terreno frente a las tensiones a las que está sometido. Por tanto, este tipo de análisis necesita conocer la siguiente información:

- Cargas actuantes sobre el talud. En general, la principal fuerza desestabilizante es el propio peso del talud.
- Métodos para transformar las anteriores cargas en tensiones internas del talud.
- La respuesta del talud a estas tensiones internas.
- Los parámetros resistentes del terreno (la resistencia mecánica de los distintos suelos de la ladera).

Para transformar las cargas actuantes en tensiones internas, se utilizan los modelos de comportamiento que son desarrollados en el campo de la geotecnia. Uno de los modelos más utilizados en ingeniería geológica es la ley de comportamiento de Mohr-Coulomb que tiene la siguiente expresión:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi) \quad \text{Eq. 5}$$

Donde:

τ = tensión tangencial (cortante) (kN/m²).

c = cohesión del suelo (sin raíces) (kN/m²).

σ = presión vertical (kN/m²).

ϕ = ángulo de fricción interna del suelo (°).

En la anterior fórmula, la cohesión y el ángulo de fricción interna son los parámetros resistentes del suelo; es decir, son las variables que expresan la resistencia mecánica del terreno. Los términos τ y σ son las tensiones internas.

De la representación gráfica de la anterior ecuación en unos ejes coordenados, donde las abscisas sean las tensiones normales y las ordenadas las tensiones tangenciales, se obtiene la siguiente recta:

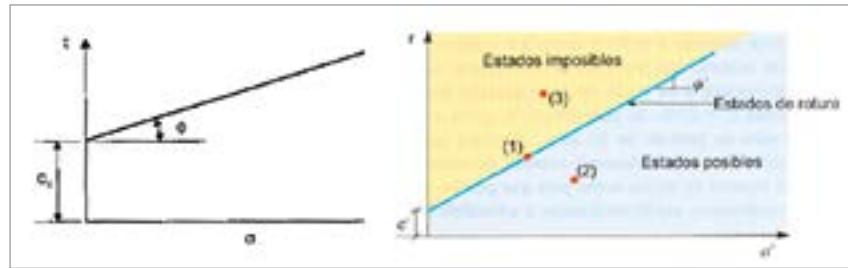


Imagen 149. En la imagen izquierda se representa la ley de comportamiento de Mohr-Coulomb. En la imagen derecha se indican los estados de tensión posibles y los que dan lugar a rotura o fallo del talud.

Todo aquel estado de tensiones internas que quede por encima de la recta de resistencia se considera imposible; es decir, son estados inestables que darían lugar a fallo o colapso del talud.

Un parámetro con gran influencia en la resistencia de los taludes es la presión intersticial (presión del agua presente en el interior de los poros del suelo). La presión del agua se incorpora en la ley de Mohr-Coulomb dando lugar a la conocida ecuación de Terzaghi, que tiene la siguiente expresión:

$$\tau = c + (\sigma - u) \cdot \operatorname{tg}(\phi) \quad \text{Eq. 5}$$

Donde: u = presión intersticial (kN/m²).

Se puede observar cómo la presión intersticial disminuye notablemente la resistencia del terreno. De ahí la importancia de contar con buenos drenajes en el diseño y estabilización de laderas y taludes. En los casos más sencillos, la presión intersticial se puede calcular como la presión estática que se determina a partir del peso específico del agua y la profundidad del punto que se analice. Para esto, es muy útil dibujar la red de flujo de agua (con sus líneas de corriente y sus líneas equipotenciales) en el interior del talud.

El valor de la presión intersticial se calcula como:

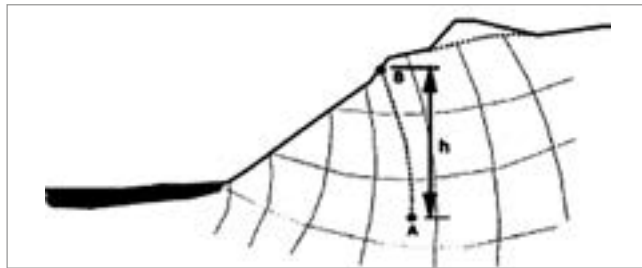


Imagen 150. Profundidad a utilizar para calcular la presión intersticial en un punto (en el ejemplo, el punto A).

$$P_{\text{INTERSTICIAL}} = h \cdot \gamma_w \quad \text{Eq. 7}$$

Donde:

h = profundidad del punto analizado obtenida a partir de la red de flujo.

γ_w = peso específico del agua (kN/m³).

En caso de no disponer de la red de flujo, se puede utilizar la profundidad obtenida directamente con respecto al nivel freático, aunque, en este caso, se estará sobreestimando el valor de la presión intersticial.

La comprobación de estabilidad global consiste en el análisis de estabilidad del conjunto terreno-entramado. Para ello, se suelen utilizar los métodos de equilibrio límite en los que se compara para cada una de las superficies de deslizamiento analizadas, las fuerzas desestabilizantes y la resistencia a cortante del terreno. Esta comprobación es posterior a las anteriores comprobaciones de estabilidad externa, por lo que se asume que el entramado es estable frente al vuelco y al deslizamiento. Estos métodos son los más utilizados en la práctica debido a su sencillez y porque, tras décadas de comparación y calibración de los modelos, el valor del coeficiente de estabilidad obtenido da buenas aproximaciones del valor real o exacto.

El método del equilibrio límite establece que la rotura del terreno se produce a través de una línea que representa la superficie de rotura. De esta forma, se interpreta que la masa de terreno por encima de dicha línea se desplaza respecto a la masa inferior, produciéndose así, la rotura del terreno. Justo en el momento de producirse la rotura, la resistencia al corte a lo largo de la superficie de deslizamiento está movilizada, y el terreno se encuentra, en su totalidad, en equilibrio estático.

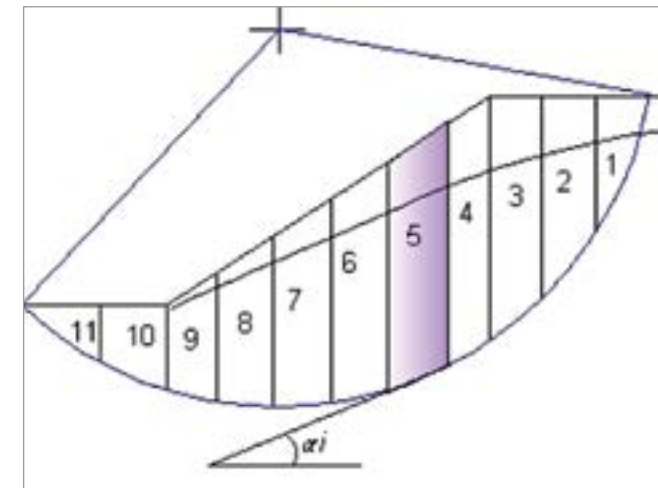
La estabilidad del talud o ladera se expresa a partir del factor de seguridad o estabilidad. Este factor compara la resistencia máxima del talud con las fuerzas a las que está sometido. Valores superiores a la unidad, expresan condiciones estables de ladera. Por el contrario, un valor del coeficiente de estabilidad inferior a la unidad expresa situaciones inestables de la ladera.

$$FS = \frac{\text{Resistencia}_{\text{máxima}}}{\text{Resistencia}_{\text{movilizada}}} \quad \text{Eq. 8}$$

Un valor aceptable del factor de seguridad es de 1,3 para situaciones temporales y de 1,5 para situaciones permanentes. Aparte, el valor mínimo del factor de estabilidad adoptado también puede ser mayor si la rotura del talud pudiera dar lugar a graves pérdidas materiales o a riesgos para la salud humana.

En los métodos de equilibrio límite más modernos se discretiza el suelo en fajas o dovelas y se analiza el equilibrio de fuerzas y/o momentos en cada una de ellas. La generalización del anterior cálculo al conjunto del volumen del terreno nos permite obtener un valor del coeficiente de estabilidad del talud o ladera.

Imagen 151. Discretización del terreno inestable analizado en dovelas o fajas.



Mediante el uso de métodos de análisis por dovelas o fajas se consigue una mejor aproximación a la distribución de tensiones normales a lo largo de la superficie de deslizamiento. Aparte, el uso de dovelas facilita el análisis de taludes no homogéneos. En estos métodos, en cada una de las dovelas se analiza el equilibrio de fuerzas y/o momentos. En los métodos exactos se analizan los dos equilibrios.

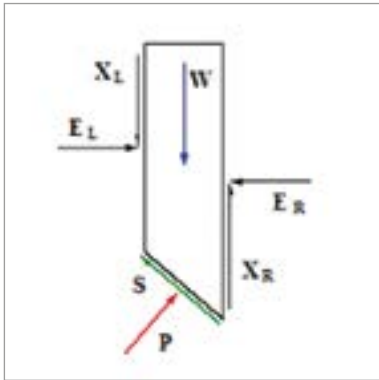


Imagen 152. Fuerzas incluidas en el análisis por dovelas en los métodos exactos. W son las cargas verticales externas, EL y ER son las fuerzas normales izquierda y derecha entre dovelas; XL y XR son las fuerzas verticales entre dovelas a izquierda y derecha; P y S son la fuerza normal y tangencial a la base de la dovela

En el análisis de fuerzas y momentos a nivel dovela se deben incluir los efectos de los refuerzos (e.g., anclajes, bulones, geosintéticos, etc.) y el efecto de refuerzo de las raíces.

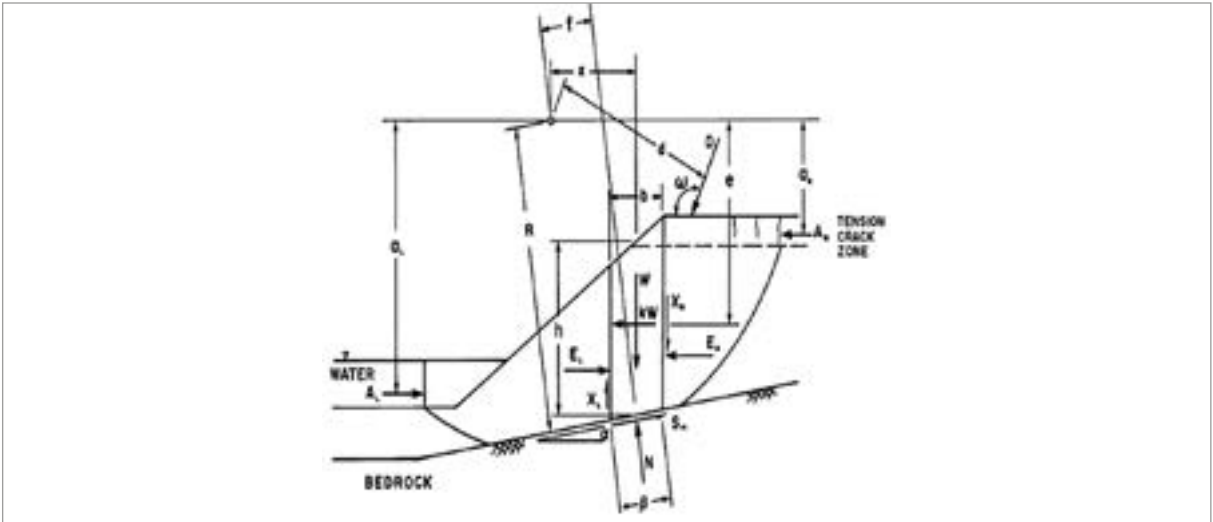
En los métodos exactos, se plantean dos expresiones para comprobar la estabilidad en cada una de las dovelas. Una que muestra el equilibrio de fuerzas y otra que muestra el equilibrio de momentos.

En las siguientes fórmulas se muestran las expresiones correspondientes al método general de equilibrio límite (MGEL) (Fredlund, 1970).

$$FS_{FUERZAS} = \frac{\sum (c' \cdot \beta \cdot \cos \alpha + (N - u \cdot \beta) \tan \phi \cdot \cos \alpha)}{\sum N \cdot \sin \alpha - \sum D \cdot \cos \omega} \quad \text{Eq. 9}$$
$$FS_{MOMENTOS} = \frac{\sum (c' \cdot \beta \cdot R + (N - u \cdot \beta) R \cdot \tan \phi)}{\sum W \cdot x - \sum N \cdot f \pm \sum D \cdot d} \quad \text{Eq. 10}$$

En la siguiente imagen se muestra el significado geométrico de las distintas variables.

Imagen 153. Significado geométrico de las variables utilizadas en el MGEL (adaptado de Khran, 2004)



En la práctica, para realizar el análisis de estabilidad se utilizan programas especialmente diseñados para ello. Existen diversos programas comerciales para cuyo uso es necesario adquirir una licencia, aunque también existen programas de uso libre muy completos que permiten analizar la práctica totalidad de los distintos tipos de problemas de estabilidad de taludes. Un ejemplo de este último caso es el programa ssap (slope stability analysis program) desarrollado por un equipo de personas liderado por el profesor Lorenzo Borselli (<https://www.lorenzo-borselli.eu>) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (Méjico). Este programa se puede descargar libremente (<https://www.ssap.eu/>) y está continuamente actualizado por su equipo técnico.

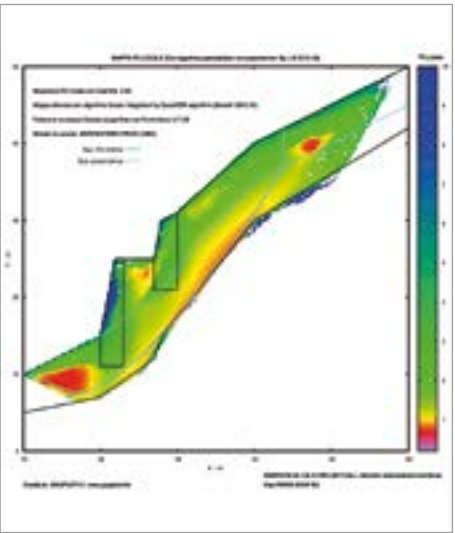


Imagen 154. Mapa mostrando los factores de estabilidad local obtenido con el programa ssap (Borselli, 2013)

Para incorporar los efectos de las técnicas de bioingeniería utilizadas en el análisis de estabilidad se plantean dos escenarios temporales:

El corto plazo (FASE 1): la vegetación aún no ha desarrollado sus sistemas radicales y las técnicas utilizadas se representan como materiales con un alto valor de cohesión.

El largo plazo (FASE 3): la vegetación ya ha desarrollado su sistema radical y se incrementa el valor de la cohesión del suelo explorado por las raíces para lo cual se utilizarán los métodos de refuerzo de raíces explicados en otras secciones de la presente guía.

7.3.5.6 Comprobación de la estabilidad interna

La comprobación de estabilidad interna consiste en la determinación de los esfuerzos a los que están sometidos los elementos del entramado y a su comparación con su resistencia mecánica. Como se ha comentado en anteriores epígrafes, la resistencia mecánica de los materiales utilizados en las obras de bioingeniería va disminuyendo con el paso del tiempo (Tardío & Mickovski, 2023).

El objetivo es diseñar y dimensionar las obras de forma que las secciones utilizadas aporten una estabilidad al conjunto de la obra que permita a la vegetación desarrollarse y materializar sus posibilidades de refuerzo y estabilización. Para ello, hay que incorporar en el cálculo las posibles pérdidas de sección mecánica efectiva debido a los procesos de deterioro (Tardío & Mickovski, 2016; Tardío & Mickovski, 2023). Algunos métodos para estimar estos procesos se han analizado en otros epígrafes de este mismo manual.

En la comprobación de estabilidad interna se utilizarán coeficientes de mayoración de las cargas y de minoración de las resistencias de los materiales (por ejemplo, según la metodología empleada en el Eurocódigo). En este último caso, se tendrá también en cuenta las condiciones de servicio de la madera empleada (madera en contacto con el suelo).

A la hora de determinar los esfuerzos a los que están sometidos los elementos de un entramado, se pueden seguir dos enfoques:

- Utilizando la teoría de silos, en la que el entramado se analiza como un conjunto de compartimentos (o celdas) rellenos de tierra colocados unos encima de otros y sometidos a cargas externas.
- Utilizando la teoría monolítica y los efectos de las fuerzas externas.

En ambos casos, se simula el larguero (ver notación de los elementos de un entramado) como una viga biapoyada sometida a una carga uniformemente repartida.

La notación seguida en los elementos del entramado es la siguiente:

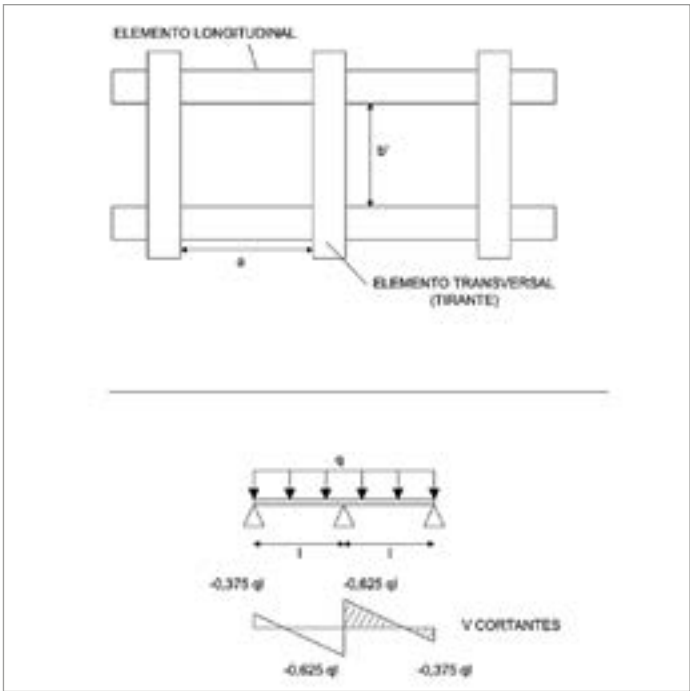


Imagen 155. Notación de los elementos de un entramado de madera (adaptado de Menegazzi y Palmeri, 2013)

Se suele realizar la comprobación de los largueros en vez de los travesaños, al tener estos últimos menor longitud y, por tanto, estar sometidos a valores de flexión menores. Según este planteamiento, la tensión máxima se calculará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{M}{W_x}$$

Eq. 11

Con:

$$W_x = \frac{\pi \cdot D^3}{32}$$

Eq. 12

$$M = \frac{q \cdot L^2}{8}$$

Eq. 13

Donde:

- M = momento de diseño (kNm).
W_R = módulo resistente de una sección circular (m³).
D = diámetro del elemento de madera (m).
L = longitud de pandeo a flexión (en general igual a la distancia libre entre los puntos de unión de los largueros y los travesaños) (m).
q = carga lateral uniforme sobre el larguero (kN/m).

La principal diferencia entre los dos enfoques señalados se centra en el método seguido para calcular el valor de q (carga lateral uniforme sobre el larguero).

Para el cálculo de la resistencia de cálculo de los materiales se tienen en cuenta los coeficientes de minoración siguientes: k_{mod} = 0,5 (correspondiente a una clase de servicio 3 de la madera); γ_M = 1,3 (coeficiente de minoración de la resistencia característica de la madera).

Enfoque según la determinación de presiones en silos (teoría de silos):

En esta teoría no se puede considerar el entramado como un conjunto monolítico. El entramado es entendido como un conjunto de celdas o jaulas sometidas a cargas externas desde todos sus lados. En las celdas, el empuje de tierras no aumenta linealmente con la profundidad debido a las fuerzas de fricción existentes entre los troncos y el relleno (Acharya, 2018).

Debido a la inclinación del entramado, la transmisión de las presiones a través de los distintos compartimentos (o celdas) del entramado difiere respecto a los silos típicos, que son completamente verticales. Se ha observado que, en una primera fase, las presiones son soportadas por los elementos del entramado y, posteriormente, son transmitidas al relleno (Brandl, 1980). A medida que la presión en las celdas (o compartimentos) aumenta, la presión en las uniones y extremos de la cara externa del entramado disminuye y, por el contrario, aumenta en las uniones y extremos de la cara interna del entramado. Debido a esta situación, la inclinación del entramado, respecto a la vertical, no debe ser mayor de 35° (Acharya, 2018). Así mismo, para una correcta transmisión del peso del relleno a los elementos del entramado, la relación entre la longitud y la anchura de las celdas (compartimentos) no debe ser superior a 2.

Las presiones existentes en las jaulas o compartimentos formados en el interior de un entramado de madera son las siguientes:

- Los largueros están sometidos a flexión desviada y los travesaños a flexión en el plano vertical y a tracción.
- Los travesaños soportarán tanto presiones horizontales a ambos lados (que se cancelan entre sí) como presiones verticales. Los largueros del trasdós soportarán empujes de tierra en su cara externa y presiones tipo silo en su cara interna. Los largueros del frente del entramado solo soportarán presiones tipo silo en su cara interior.

En el caso de entramados de pared simple, dado que no se forman los compartimentos o jaulas, la teoría de silos no es aplicable. Además, en este caso las deformaciones son mayores debido a que la resultante de empuje de tierras está más próxima al frente del muro.

La teoría de silos nos permite determinar el valor de las presiones máximas en compartimentos rellenos de material granular. Según esta teoría, la máxima presión se calcula de acuerdo con la siguiente expresión (Brandl, 1980):

$$p_{HMAX} = \frac{(a \cdot b') \cdot \gamma_r}{2(a + b') \cdot \tan \delta}$$

Eq. 14

Donde:

- a = distancia entre travesaños (m).
b' = distancia entre largueros (m).
γ_r = peso específico del relleno (kN/m³).
δ = ángulo de rozamiento entre los troncos y el relleno (°) = 0,8*φ.

El significado de las dimensiones de a y b' se muestra en la siguiente imagen:

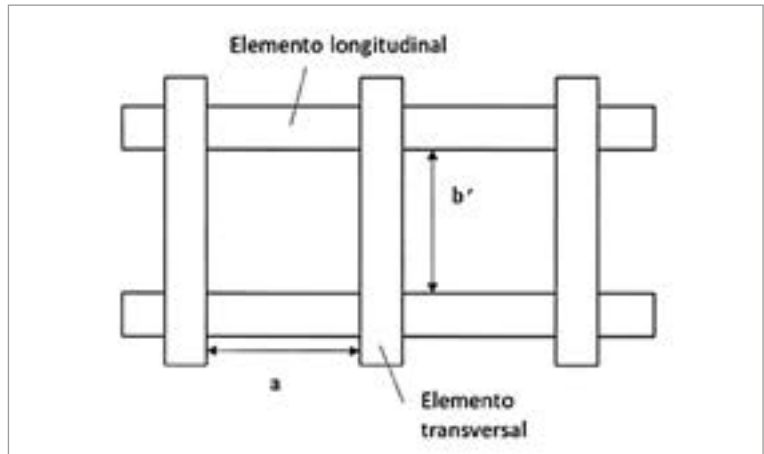


Imagen 156. Significado de los parámetros a y b'. (adaptado de Menegazzi & Palmeri, 2013)

En este caso, el valor de q suponiendo que los largueros y los travesaños tienen el mismo diámetro, se obtiene de acuerdo con:

$$q = p_{HMAX} \cdot 2 \cdot D$$

Eq. 15

Donde:

D = diámetro del larguero (m).

Enfoque de la teoría monolítica y el efecto de las fuerzas externas

En este caso, se calcula la presión horizontal sobre el larguero externo de mayor profundidad. Es decir, el larguero situado a una profundidad igual a la altura del entramado y situado en la cara exterior del mismo.

En este caso:

$$p_H = K_a \cdot p_V = K_a \cdot \gamma \cdot H$$

Eq. 16

$$q = p_H \cdot 2 \cdot D$$

Eq. 17

Donde:

Ka = coeficiente de empuje activo.

H = altura del entramado.

D = diámetro del larguero (m).

γ = peso específico del terreno.

En el caso de existir sobrecargas, estas se incluirían también en el cálculo del valor de q.

7.3.5.7 Comprobación a flexión

Utilizando las Eq. 15 y Eq.16 se calcula el valor de la carga lineal q. Tomando el mayor valor de q se calcula la tensión máxima de diseño (σ) a partir de la Eq. 11, Eq. 12 y Eq. 13. Dicho valor se comparará con la resistencia a flexión de la madera utilizada. Para obtener los valores característicos de las distintas especies de madera

se puede recurrir a publicaciones y artículos especializados, como por ejemplo las publicaciones de la Escuela de Ingeniería de Montes o la Asociación de Investigación de las industrias de la madera AITIM El valor característico de resistencia de la especie utilizada se verá afectada por los coeficientes de minoración correspondientes para obtener el valor de resistencia de cálculo.

7.3.5.8 Comprobación a cortante

Respecto al cortante, en los apoyos extremos se obtiene un cortante de 0,375*q*l, mientras que en la zona central tendremos un cortante de 0,625*q*l con la sección completa. Esta última sección es la más desfavorable. Al igual que antes, el valor de q es el mayor valor obtenido a partir de las Eq.14 y Eq.16.

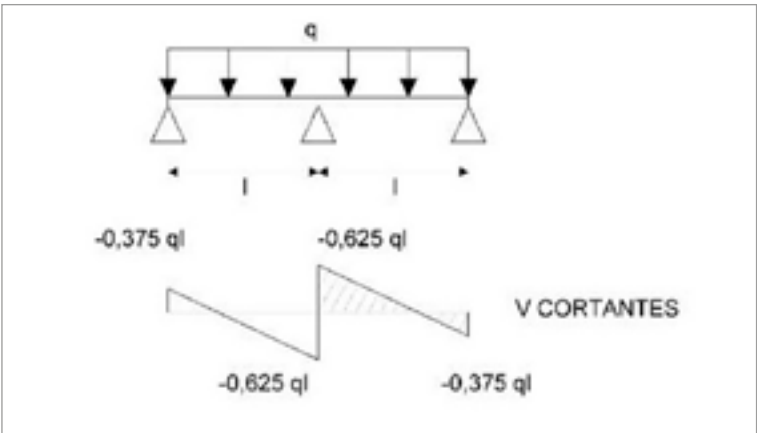


Imagen 157. Distribución de esfuerzos a cortante en los extremos y en el punto central de una viga continua biapoyada

La tensión máxima a cortante considerando un factor que incorpore el efecto de posibles fendas en la madera kcr (=0.5) es de:

$$\tau_d = \frac{4}{3} \cdot \frac{V_d}{k_{cr} \cdot A}$$

Eq. 18

La resistencia de cálculo a cortante es la siguiente:

$$f_{V,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{V,k}}{\gamma_M}$$

(N/mm²)

Eq. 19

De la comparación de los anteriores valores se determina si la pieza cumple o no (resistencia de cálculo > tensión máxima de cálculo).

7.3.5.9 Otras comprobaciones

Aparte, se deben comprobar los siguientes aspectos:

- Resistencia en las uniones de los elementos de madera.
- Comprobación perpendicular a fibra en los apoyos sobre las barras de sujeción y comprobación a hienda.

Estas comprobaciones están definidas en los manuales y libros de cálculo de estructuras de madera (Argüelles Álvarez et al., 2000).

Comprobaciones de las uniones del entramado

Las uniones entre los troncos del entramado se comprueban mediante las ecuaciones de Johansen (1949) para el caso de clavos y tirafondos. El procedimiento de comprobación de las uniones de tipo clavija será el especificado por la normativa actual recogida en el CTE.

El cálculo se basa en la determinación de los valores característicos a partir de las propiedades del material (resistencia al aplastamiento de la madera y momento plástico en la sección del medio de la unión) y de la geometría de la unión.

La resistencia al aplastamiento para unión tipo clavo en madera con pretaladro se calcula como:

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot a) \cdot \rho_k$$

Eq. 20

Donde:

$f_{h,k}$ = resistencia al aplastamiento de la pieza (N/mm²).

a = diámetro del clavo (mm).

ρ_k = densidad de la madera (kg/m³).

El momento plástico de la sección en el caso que la unión se haga mediante clavos redondos, se calcula con la siguiente expresión:

$$M_{y,k} = \frac{f_a}{600} \cdot 180 \cdot a^{2,6}$$

Eq. 21

Donde:

$M_{y,k}$ = momento plástico (Nmm).

F_a = resistencia a la tracción (N/mm²).

Para el cálculo de la capacidad de carga en sollicitación de corte se emplean uniones entre madera-madera de simple cortadura. Este procedimiento se basa en calcular los esfuerzos que soporta la unión (ecuaciones de Johansen) y elegir el más bajo como valor mínimo que resiste un clavo. Se compara este valor con el esfuerzo que ha de soportar la unión para determinar el número mínimo de elementos de unión.

Existen distintas publicaciones y artículos donde se detallan las comprobaciones de estabilidad interna y externa de distintas técnicas de bioingeniería (e.g., Menegazzi & Palmeri, 2013; Acharya, 2018).

7.3.5.10 Conclusiones de investigaciones existentes

El uso del planteamiento monolítico del entramado para su diseño y comprobación de estabilidad externa es efectivo y seguro. El fallo por vuelco es poco frecuente en este tipo de estructuras (Bullen et al., 1992). Las deformaciones, en general, se producen por deslizamiento de una capa sobre la adyacente. Es similar al caso de la deformación de muros de tierra reforzada, donde debido al anterior proceso se produce esa deformación de abombamiento en la zona inferior-media del muro.

El nivel de deformación existente en este tipo de muros justifica el uso del coeficiente de empuje activo y, de hecho, algunos autores (e.g., Bullen et al., 1992) han comprobado que el uso de la teoría de Coulomb representa bien el tipo de deformaciones existentes en los entramados o muros jaula.

Los fallos que se han detectado en el análisis de estas estructuras se pueden deber a desplazamientos laterales, asentamientos del terreno, fallos por flexión de algunos elementos y/o fallos en las uniones. En general, se observan fallos en determinadas zonas de la estructura por lo que el fallo global, sobre todo debido a su naturaleza flexible y articulada, es menos frecuente.

Por otro lado, debido a las particularidades de la vida de servicio de una obra de bioingeniería del paisaje, en el diseño a medio y largo plazo de la estructura de madera han de tenerse en cuenta:

- Las pérdidas de sección mecánica de los elementos debido a los procesos de deterioro de la madera.
- El efecto de refuerzo de las raíces.

La metodología para incluir los anteriores procesos en el diseño de la obra de bioingeniería se basa en el trabajo de Tardío & Mickovski (2023) en el que se define la metodología Tardío & Mickovski. Esta metodología permite detectar escenarios críticos de la estructura, apoyar la toma de decisiones, durante la fase de diseño y cálculo y asegurar un diseño seguro de la obra de bioingeniería en el largo plazo, por lo que se consiguen los siguientes objetivos:

- Un trasvase efectivo de las funciones de refuerzo y estabilización entre la estructura y la vegetación en desarrollo.
- La activación de procesos ecológicos, el trasvase de la multifuncionalidad de la vegetación a la vida de servicio de la obra y la provisión de servicios ecosistémicos.

La explicación de esta metodología ha sido incluida en la presente guía junto con un caso práctico a modo de ejemplo.

7.3 TÉCNICAS MIXTAS

7.3.6 Entramado Loricata



Imagen 158. Imagen de entramado Loricata

7.3.6.1 Definición y alcance

Consiste en una estructura de acero y troncos de madera rellena de tierra y arbustos, para la consolidación de taludes inestables, incluso en casos de intervenciones de emergencia. Actualmente existen en el mercado varios tipos de loricata, que se diferencian por su estructura metálica. Se trata de una estructura mixta de acero y madera conformado por una cruz de San Andrés metálica, en la que se apoyan troncos horizontales y que se ancla mediante un elemento en hormigón o metálico prefabricado, sobre la que gravita el peso de la tierra. Esta estructura se revegeta con arbustos y/o esquejes autóctonos. El entramado vivo loricata (del latín loricata, armadura) pretende representar el punto de encuentro entre el pilote vivo y la tierra vegetal reforzada, combinando en sinergia positiva las mejores características estructurales y medioambientales de los dos tipos.

7.3.6.2 Aplicaciones

Esta técnica se emplea con efectividad en los siguientes casos:

- Taludes inestables, terraplenes de carreteras.
- Por su mayor resistencia estructural frente a los entramados de madera debido al refuerzo metálico, el entramado vivo loricata se propone como alternativa a las estructuras de contención tradicionales. Esto es especialmente relevante en el sector de las infraestructuras viarias, donde, por razones de seguridad, con todas las ventajas ecológicas y paisajísticas propias de las obras de bioingeniería del paisaje.

Las principales ventajas de esta técnica son:

- Requiere menos excavación que otras técnicas.
- El efecto de consolidación inmediato.
- Posible recreación de hábitat natural.
- Buena integración paisajística y medioambiental.

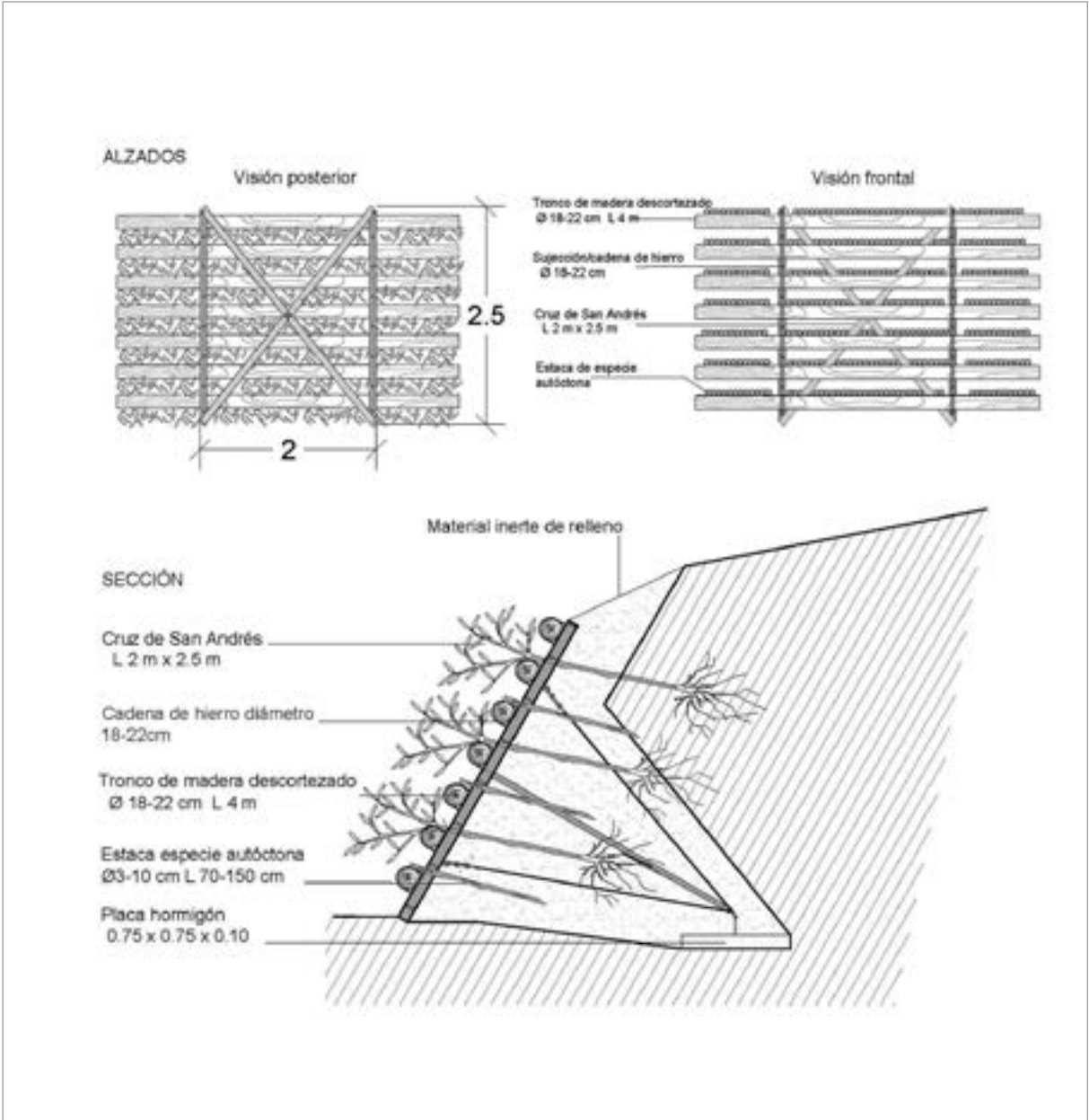
Como desventajas cabe señalar:

- El uso de la mano de obra es intenso y la instalación compleja.
- La madera se pudre con el tiempo, por lo que, además de un buen clavado, es necesario que los esquejes insertados en la estructura estén vivos y arraiguen profundamente, para que puedan sustituir la función de sostener y consolidar el talud una vez que la madera haya perdido su función.

7.3.6.3 Materiales

- Estructura metálica de anclaje único formada por una cara frontal de acero en forma de H o de X (con los extremos de la X unidos verticalmente por vigas de acero), sobre la que se apoyarán los troncos; de esta cara frontal parte un vástago central metálico que actúa como tirante rígido conectado en la base posterior a un anclaje metálico o de placa de hormigón.
- Troncos descortezados de castaño o resinosos 18-22 cm de diámetro.
- Esquejes de longitud 2-3 m y 2-5 cm de diámetro.
- Arbustos con raíces autóctonas preferiblemente con capacidad de emitir raíces adventicias desde el tallo subterráneo.
- Tierra de excavación.

Imagen 159. Alzado y perfil de entramado vivo loricata. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



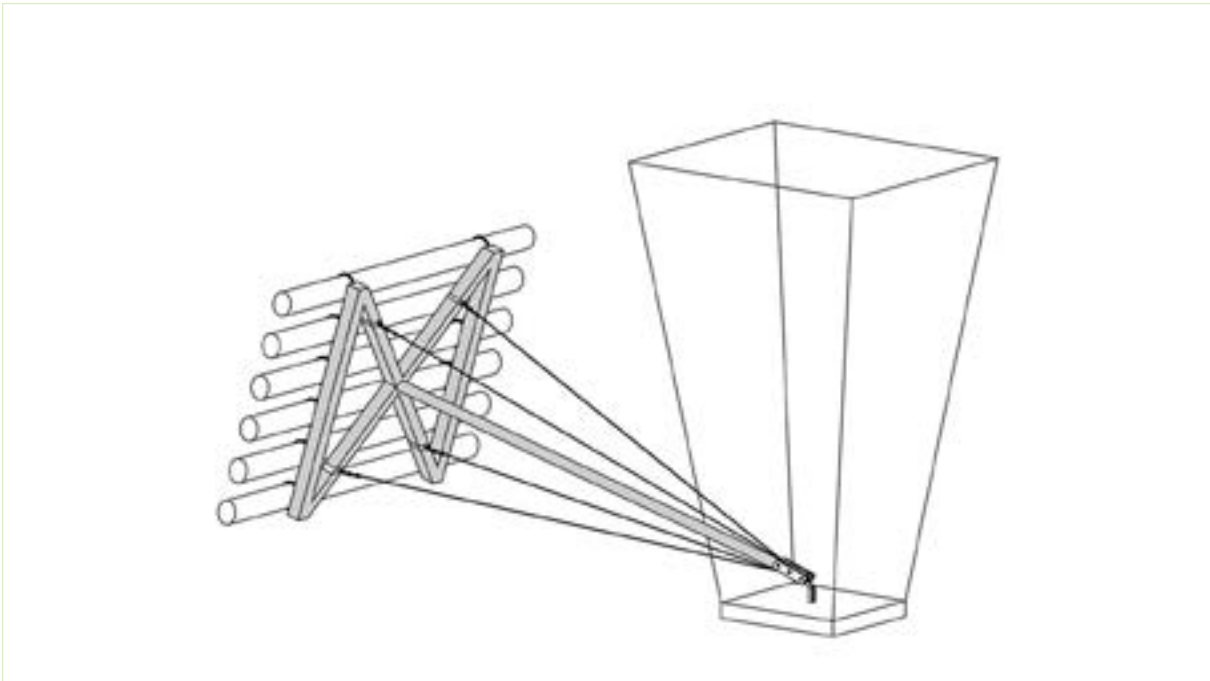


Imagen 160. Esquema de la estructura y de cómo la carga del peso de la tierra sobre el anclaje estabiliza la estructura.
Fuente: P. Cornellini con dibujo de S. Sangalli - SCIA S.L.

7.3.6.4 Ejecución de las obras

1. **Excavación** para la colocación de la placa de cimentación.
2. **Colocación de la estructura de acero del tipo cruz de San Andrés.** Las caras frontales metálicas tienen una anchura aproximada de 1,5 a 2 m en función de la altura.
3. **Colocación del entramado de madera.** Será de una longitud de 3-4 m y con un diámetro de 20 cm aproximadamente. Éstas se fijarán paralelas entre sí, al frente metálico con conexiones de acero y se colocarán a una distancia tal entre sí que la tierra de relleno quede equilibrada en las ventanas. Los troncos sobresalen de la cara frontal aproximadamente 1 m a cada lado.
4. **Relleno de la estructura.** Se utilizará material inerte proveniente de la excavación. Además, se colocarán estacas o arbustos en contenedores forestales, de especies pioneras autóctonas con capacidad de emitir raíces adventicias, en los huecos entre troncos. Los esquejes no deben sobresalir más de 10-20 cm del pilote y deben llegar hasta el suelo local.

El entramado puede realizarse en tramos modulares individuales de 3-4 m, que pueden conectarse entre sí en tramos rectos, y las conexiones en los extremos con la morfología existente también pueden realizarse con tramos de pilotaje vivo doble o latino.

7.3.6.5 Control de calidad

En el caso del material vegetal vivo, concretamente las estacas o varas, la procedencia será de zonas próximas a la obra. En el caso de planta de vivero, se certificará el origen del material que será preferentemente de Bizkaia. Se considera admisible hasta un 30 % de marras o pérdidas durante el primer año.

Se recomienda la realización de ensayos de material vegetal y madera indicados en el epígrafe 8.1. Control de calidad y controlar bien las especificaciones técnicas relativas a la estructura de acero, (condiciones de los materiales y de su instalación). Los materiales de aceros para Estructuras Metálicas deberán cumplir con las condiciones indicadas en la “Instrucción de acero estructural (EAE)”.

7.3.6.6 Medición y abono

El entramado de madera se mide por unidad de estructura realizada y en su medición se considerarán incluidas la recogida del material vegetal, su suministro y su colocación.

7.3.6.7 Recomendaciones

- La inclinación frontal de la estructura metálica no debe superar los 60°.
- Los elementos de anclaje de los troncos a la estructura deben estar espaciados en función del diámetro de los troncos para que el suelo esté equilibrado entre ellos.
- Para facilitar la aplicación, el relleno con tierra y plantas debe hacerse por capas al final de la colocación del primer tronco, para una mejor compactación del suelo y evitar la formación de huecos.
- Las estacas deben ser más largas que el espesor de la obra hasta que toquen la tierra que tienen detrás y así arraiguen, mientras que la parte delantera debe sobresalir unos 10 cm.

7.3.6.8 Propuesta de precio descompuesto: entramado de madera loricata

Se establecen dos precios en función del tipo de estructura, en acero o en acero galvanizado:

Imagen 161. Entramado Loricata acero

ud Entramado Loricata acero					
ud de realización de un entramado Loricata para 8 m2 de talud, estructura mixta compuesta por una estructura de acero en forma de cruz de San Andrés (2 x 2,5 m) y troncos horizontales de madera de conifera descortezados (D20-25 cm) L 4 m, sujetos mediante cadenas. La estructura se empotra en el terreno y lleva un contrapeso compuesto por una placa de hormigón de 80 Kg. e inserción de estacas de especies arbustivas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa contiguas en cada estrato y/o de planta enraizada, relleno a cada estrato con tierra de la excavación. Comprende la excavación para la cimentación, el suministro, el transporte de la estructura metálica, de los troncos a pie de obra, el corte de los mismos, la construcción de la estructura, la preparación y conservación en obra del material vegetal y el relleno de la estructura. Incluido el mantenimiento durante los dos años de periodo de la garantía.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
	u	Estructura de acero de San Andrés 2,5m x 2,5 m en acero	1,000	1.800,00 €	1.800,00 €
	ud	Tronco de madera de conifera descortezada de 25 cm de	6,000	28,00 €	168,00 €
	Kg	cadenas de fierro	12,000	15,00 €	180,00 €
	ud	placa de hormigón prefabricado 80 kg peso	1,000	300,00 €	300,00 €
	m³	Relleno y edificado con tierras propia obra de material seleccionado	0,600	1,50 €	0,90 €
		Subtotal materiales:			2.448,90 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Camión 10m3 tracción total ci grúa 1t	1,000	50,00 €	50,00 €
	h	Retroexcavadora sobre orugas de 180 KW	0,500	50,14 €	25,07 €
	h	Dumper 1,5t hidráulico	0,300	29,90 €	8,97 €
	h	Grupo electrógeno de 20-30kVA	0,300	9,39 €	2,82 €
	h	Motosierra	0,200	3,50 €	0,70 €
	h	Máquina taladradora	0,300	4,00 €	1,20 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			87,86 €
3		Mano de obra			
	h	Capataz Obra civil	0,20	24,89 €	4,98 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,70	22,07 €	15,45 €
	h	Pedri ordinario construcción	1,50	18,00 €	27,00 €
		Subtotal mano de obra:			47,43 €
4	%	Costes directos complementarios	0,02	125,28 €	2,71 €
		Costes directos complementarios			
Coste de mantenimiento decenal: 38 € en los primeros 10 años 3,8 €/m3 y año			Costes directos (1+2+3+4):		2.586,89 €

tall Entramado Loricata acero galvanizado con placa en acero tipo "Aguanea"					
ud. de realización de un entramado Loricata para 8 m2 de talud , estructura mixta compuesta por una estructura de acero galvanizado Z275 J0 en forma de cruz de San Andrés (2 x 2,5 m) y troncos horizontales de madera de conifera descortezados (D20-25 cm) L 4 m, sujetos mediante cadenas. La estructura metálica lleva un contrapeso compuesto por una placa de acero galvanizado Z275 J0 inserción de estacas de especies arbustivas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa contiguas en cada estrato y/o de planta enraizada, relleno a cada estrato con tierra de la excavación. Comprende la excavación para la cimentación, el suministro, el transporte de la estructura metálica, de los troncos a pie de obra, el corte de los mismos, la construcción de la estructura, la preparación y conservación en obra del material vegetal y el relleno de la estructura. Incluido el mantenimiento durante los dos años de periodo de la garantía.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	Materiales				
	m	Estructura de acero galvanizado Z275 J para Loricata 2,3m x 2 m con cables de 6mm Ø (1900 N / mm²)	1.000	2.000,00 €	2.000,00 €
	ud	Tonco de madera de conifera descortezada de 25 cm de	6.000	28,00 €	168,00 €
	Kg	cadenas de fierro galvanizado para sujeción	12.000	15,00 €	180,00 €
	ud	Placa de s' pup en acerp galvanizado Z275 J0	1.000	300,00 €	300,00 €
	m³	Relleno y extendido con tierra propia obra de material seleccionado	0.600	1,50 €	0,90 €
Subtotal materiales:					2.648,90 €
2	Equipo y maquinaria				
	h	Camión 10m3 tracción total ci grúa 16t	1.000	50,00 €	50,00 €
	h	Retractor sobre orugas de 150 kW	0.500	50,14 €	25,07 €
	h	Dumper 1,5t hidráulico	0.300	26,90 €	8,07 €
	h	Grupo eléctrico de 20-30kW	0.300	9,39 €	2,82 €
	h	Motobomba	0.200	3,50 €	0,70 €
	h	Máquina taladradora	0.300	4,00 €	1,20 €
Subtotal equipo y maquinaria					87,86 €
3	Mano de obra				
	h	Capataz obra civil	0.20	24,89 €	4,98 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0.70	22,07 €	15,45 €
	h	Peón ordinario construcción	1.50	18,00 €	27,00 €
Subtotal mano de obra:					47,43 €
4	Costes directos complementarios				
	%	Costes directos complementarios	0.02	135,29 €	2,71 €
Coste de mantenimiento decenal 38 € en los primeros 10 años 3,8 €/m2 y año					2,786,89 €

Imagen 162. Entramado Loricata acero galvanizado con placa en acero tipo "Aguanea"

7.3.6.9 Descripción de la estructura

El entramado tipo Loricata es una estructura metálica modular para la consolidación de taludes que sujeta los troncos del frontal con forma de entramado, anclada al terreno, con la que se puede estabilizar el frente de un talud.

La disposición de la estructura sobre el terreno se realiza mediante una placa sobre la cual reposan las tierras y permiten la fijación de la pieza. Esta placa queda anclada al suelo mediante la fuerza de rozamiento terreno-placa. Para los terrenos duros se prevé un anclaje de tipo activo a definir según las características mecánicas del mismo.

La estructura está constituida por elementos de acero galvanizado resistentes a la corrosión. La anchura de, en general, cuatro metros de talud se consigue mediante la fijación de troncos a la estructura que dan la superficie de contacto necesaria con el terreno para transmitir los empujes de este sobre la pieza metálica. La inclinación de los taludes es fija de, en general, 60 grados respecto la horizontal.

7.3.6.10 Acciones, coeficientes y combinaciones

Las acciones a considerar se clasifican según los criterios siguientes:

- Clasificación por naturaleza.
- Clasificación por su variación en el tiempo.
- Clasificación por su variación en el espacio.

Las acciones se pueden definir como directas, de tipo permanente, variables y fijas. Las acciones sobre la estructura serán:

- Cargas permanentes de valor constante: Propio peso / Cargas muertas / Empuje tierras.
- Acciones variables: Sobrecarga de uso.

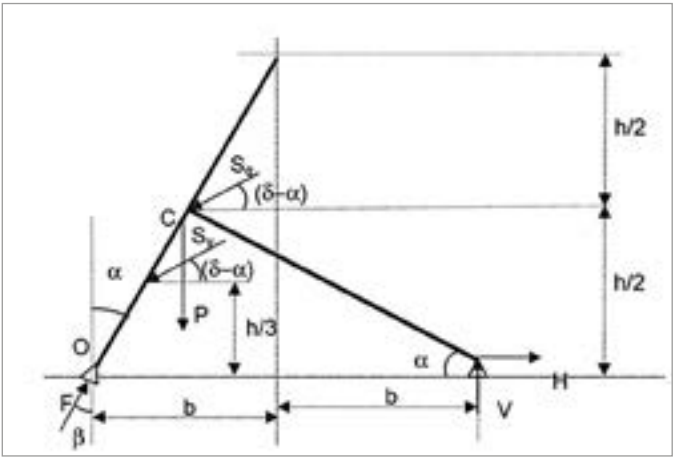


Imagen 163. Esquema de fuerzas actuantes en el entramado tipo Loricata

Para la comprobación de los estados límites tanto de servicio como último, será necesario definir los coeficientes parciales de mayoración de las acciones según la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera de la Dirección General de Carreteras (IAP-11).

La definición de las distintas combinaciones de acciones se realizará de acuerdo con el Eurocódigo 7: Norma europea para unificar los criterios y normativas europeas en relación con el proyecto geotécnico de estructuras en edificación y obra civil.

Cada combinación representa un conjunto de valores de cálculo empleado para la verificación de la fiabilidad estructural de un estado límite bajo la acción simultánea de varias acciones. La combinación de acciones se analizará tanto para la comprobación del Estado Límite Último como para el Estado Límite de Servicio.

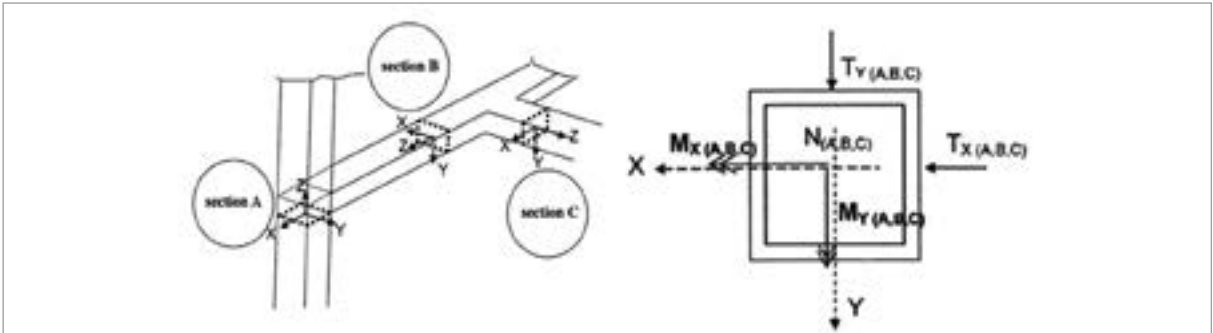
7.3.6.11 Cálculos referentes a la capacidad estructural del entramado Loricata

Este tipo de entramado contiene perfiles metálicos de distinta sección. A continuación, se indican las características más frecuentes de la estructura metálica del entramado Loricata.

La parte principal de la estructura suele estar construida mediante perfiles metálicos huecos estándar tipo 80x3 mm. Las uniones de los diferentes perfiles se realizan mediante soldadura. La parte principal se conecta con el punto de soporte de la estructura mediante un perfil hueco de tipo circular, de 60x3 mm. La conexión de este perfil con la estructura principal se realiza mediante soldadura. La conexión del perfil tubular con el punto de fijación se realiza de la misma forma, por lo que se considera un empotramiento.

En las siguientes imágenes se muestran ejemplos de las distintas secciones que forman parte del marco metálico del entramado.

Imagen 164. Ejemplos de secciones de perfiles tubulares rectangulares huecos que conforman la estructura metálica del entramado Loricata



La estructura principal incorpora dos perfiles cuadrados también de 80x3 mm que sirven para rigidizar el conjunto. Para reducir los esfuerzos sobre los perfiles también se dispone de cuatro tensores que permiten reducir las tensiones máximas de los perfiles principales. El panel frontal en forma de cruz sirve a su vez como soporte para los troncos que finalmente serán los encargados de dar los 4 metros de longitud al panel y recoger los empujes totales hacia la estructura.

Por otro lado, las fuerzas desestabilizantes serán los distintos empujes del terreno debidos al peso del suelo, a las sobrecargas, presión hidrostática, etc. Su cálculo se realizará de acuerdo con lo explicado en los epígrafes correspondientes del presente manual.

A partir de las solicitaciones se calcularán las distintas leyes de esfuerzos que soportan los distintos elementos metálicos del marco metálico (leyes de axiles, cortantes, momentos flectores y momentos torsores).

Se comparará la capacidad resistente de cada elemento con el valor del esfuerzo máximo al que está sometido. Esta comparativa se realizará para todos los esfuerzos obtenidos: esfuerzo axial a tracción, esfuerzo axial a compresión, momento flector, esfuerzo cortante y momento torsor. En los casos en los que sea necesario, también se comprobarán las combinaciones existentes de los anteriores esfuerzos (por ejemplo, momento torsor y cortante combinado, interacción flexión-cortante, interacción flexión-axial y flexión desviada).

Por último, también se comprobarán los tensores y las soldaduras.

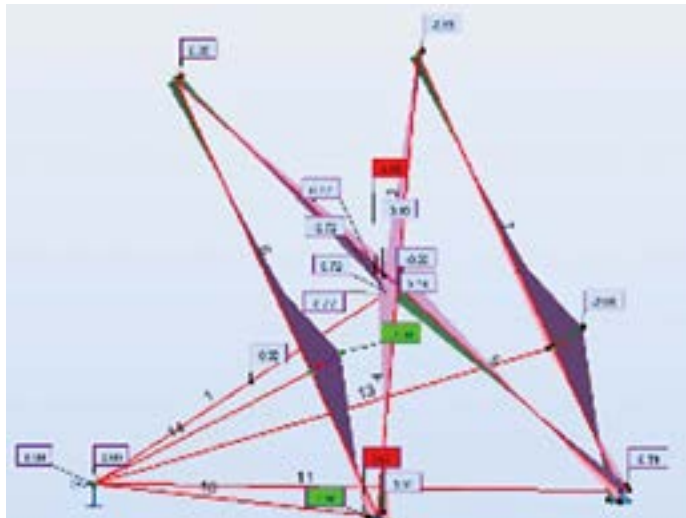


Imagen 165. Imagen mostrando un ejemplo de las leyes de momentos flectores que soportan los distintos elementos metálicos de la estructura.

7.3.6.12 Comprobaciones de estabilidad externa

Se realizarán dos comprobaciones para verificar que la estructura es estable bajo cualquier combinación de acciones. La primera verificación consiste en comprobar que la estructura es estable al deslizamiento. Se comprobará que los empujes resultantes del terreno sobre la misma no desestabilizan la estructura. La segunda verificación consiste en comprobar que la estructura es capaz de mantenerse en el plano horizontal estable bajo cualquier combinación de acciones; es decir, que no se producen rotaciones en el plano transversal (comprobación a vuelco).

Deslizamiento

Para poder determinar la seguridad al deslizamiento del elemento se tendrán que suponer unas dimensiones (geometría) de la placa de cimentación con la que se podrá comprobar si es suficiente o no con las dimensiones propuestas.

La resultante vertical del peso de tierras se calculará a partir de un volumen efectivo en forma trapezoidal, tal y como se muestra en el ejemplo de la siguiente imagen:

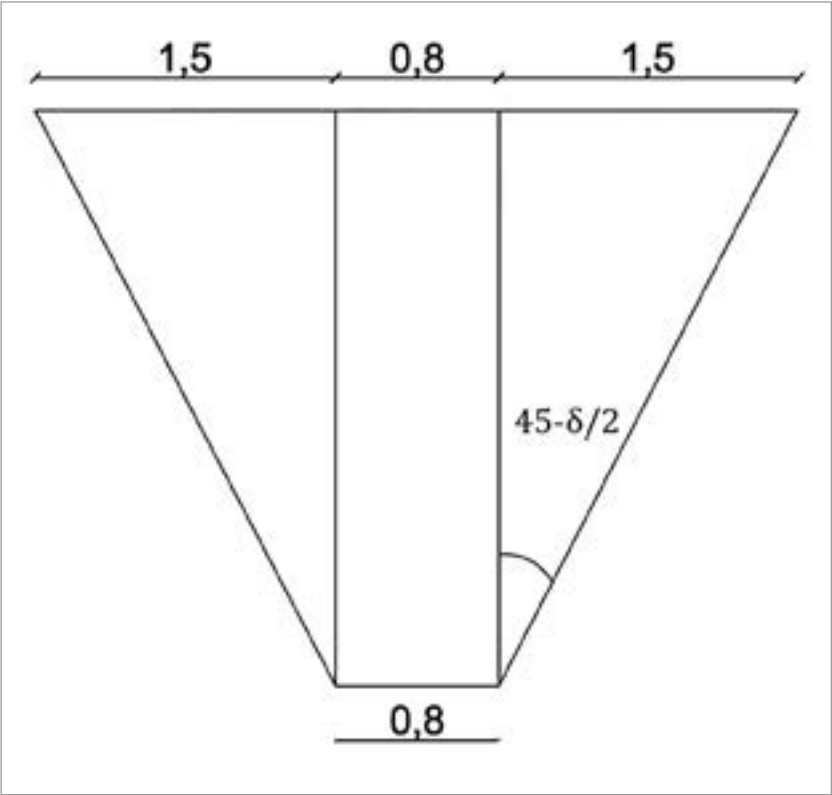


Imagen 166. Ejemplo de definición de la cuña de tierras movilizada sobre la placa de anclaje del entramado Loricata. Caso de una placa de anclaje de 0,8 m de lado

Teniendo en cuenta que la reacción de la placa tiene sentido contrario al valor del peso de las tierras, la resultante vertical V será igual a:

$$V = W_{te} - R_{pl}$$

Donde:

W_{te} = peso del terreno.
 R_{pl} = reacción de la placa.

A partir de la anterior fuerza vertical (V) se podrá determinar la resistencia al deslizamiento. Esta se incluirá en el numerador de la expresión del factor de seguridad.

El valor del coeficiente de rozamiento para un terreno sin cohesión se puede calcular a partir de la expresión:

$$\tan \theta_c = 0.8 \cdot \tan \varphi'$$

Donde:

θ_c = ángulo de rozamiento anclaje-terreno.
 φ' = ángulo de rozamiento interno del terreno.

Por otro lado, el valor de las cargas de empuje en dirección horizontal (H) se incluirá en el denominador de la expresión del factor de seguridad a deslizamiento.

Por tanto, el coeficiente de seguridad frente a deslizamiento vendrá determinado por:

$$F_d = \frac{V \cdot \tan \theta_c}{H}$$

Este coeficiente deberá ser superior a 1.5 en todo momento.

Vuelco

En primer lugar, se obtendrán los empujes en combinación de acciones casi-permanente. En esta situación, se considera que el momento de vuelco (momento desestabilizante) resultante de los empujes para el caso con sobrecarga será:

$$M_b = E_t \cdot \frac{H}{3} + SC \cdot \frac{H}{2}$$

Donde:

- Et = empuje de tierras.
- H = altura del entramado.
- SC = sobrecarga.

Por otro lado, como momentos estabilizadores se incluirán el peso de los troncos, el peso propio de la estructura metálica y el peso de tierras sobre la placa de anclaje:

$$M_e = P_p \cdot a + P_t \cdot b + W_{te} \cdot c$$

Donde:

- Pp = peso propio de los troncos de madera.
- Pt = peso propio estructura metálica.
- Wte = peso del terreno sobre la placa de anclaje.
- a = brazo de Pp.
- b = brazo de Pt.
- c = brazo de Wte.

Para poder satisfacer la condición de estabilidad por vuelco de la estructura deberá cumplirse que la relación entre el momento de vuelco (desestabilizante) y el momento estabilizador sea mayor que 2. Por tanto, el factor de seguridad deberá ser mayor o igual a 2. En este caso, se puede determinar el valor de peso de tierras necesaria para poder garantizar la estabilidad:

$$F_s = \frac{M_e}{M_b}$$

Donde:

- Me = momentos estabilizantes.
- Mb = momentos desestabilizantes.

7.3 TÉCNICAS MIXTAS

7.3.7 Enrejado vivo



Imagen 167. Pista Leizaran durante la ejecución de las obras y la estructura desarrollada. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.

7.3.7.1 Definición y alcance

El enrejado vivo de madera es una técnica mixta de estabilización de taludes que se utiliza para la contención superficial de suelos inestables en pendientes comprendidas entre 40° y 55°, llegando a 60° en condiciones particulares. Esta técnica consiste en una estructura de madera conformada por troncos verticales y troncos horizontales dispuestos perpendicularmente, formando una retícula, y unidos entre sí mediante clavos o tornillos. Las cámaras de la retícula se rellenan de material vegetal vivo, con capacidad de reproducción vegetativa—generalmente estacas o arbustos en contenedor forestal—, y con tierra de excavación o suelo estructural. Posteriormente, se siembra con una siembra a voleo o una hidrosiembra. Una vez las ramas enraízan y se desarrollan, la vegetación resultante asume gradualmente las funciones estructurales de los enrejados vivos. Esta técnica se utiliza para la contención superficial de suelos inestables en pendientes comprendidas entre 40° y 55°, llegando a 60° en condiciones particulares.

Existen dos tipologías:

• Enrejado vivo

El enrejado vivo puede descansar directamente sobre el suelo, requiriendo siempre una fijación para el pie de la estructura. Dicha fijación se lleva a cabo, generalmente, mediante una excavación en la que se entierra un poste horizontal que estabiliza el pie de la estructura. Otra alternativa es la utilización de estructuras de soporte tales como entramados vivos a pared doble, entramados loricata o muros verdes.

Los enrejados vivos se pueden aplicar en taludes de una altura considerable, siempre que los perfiles del talud se conformen adecuadamente. En los taludes con pendientes elevadas, de más de 50°, no se debería plantear el enrejado por encima de los 6 a 8 m. Superada dicha altura será necesario incorporar una terraza o berma en el perfil del talud para no poner en peligro la estabilidad de la estructura.



Imagen 168. Enrejado normal y enrejado tipo “Vesubio” con empalizada en los transversales. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L. y G. Menegazzi

Al igual que con otras técnicas de bioingeniería del paisaje, la madera empleada aporta una vida de servicio a la estructura que permite el desarrollo y consolidación de las comunidades vegetales. Una vez desarrollada la vegetación, los troncos empleados cumplirán una función de abono de liberación lenta lo cual mejorará y fertilizará las capas superficiales del suelo.

• **Enrejado vivo “Vesubio” utilizado en suelos sueltos con poca cohesión sobre una capa de suelo estable**

Es una variante del enrejado vivo válida para la contención de taludes con suelos inestables con pendientes de entre 45° y 55°. Dichos suelos se caracterizan por la presencia de una gruesa capa de material suelto en un terreno estable. Puede llevarse a cabo con efectividad en un talud de 15 m de longitud máxima, que requiere ser estabilizado.

Las principales ventajas del enrejado son:

- Estabilización inmediata del talud. El efecto estabilizador aumenta con el desarrollo y el enraizamiento de la vegetación utilizada.
- Las especies vegetales empleadas realizan también una función drenante al absorber agua para su propio desarrollo.

7.3.7.2 Aplicaciones

Esta técnica se emplea con efectividad en los siguientes casos:

- Reconstrucción del perfil de desmonte en pendientes comprendidas entre 45° y 55°. En casos excepcionales hasta 60°.
- Estabilización de laderas hasta una profundidad de 0,5-1 m.
- Consolidación de las capas inestables de suelos con un espesor no superior a 0,5 m con pendiente demasiado elevada para aplicar otras técnicas de estabilización de bioingeniería.
- Protección de superficies erosionadas con terreno particularmente compacto.
- Recubrimiento de laderas en roca o gunitadas, siempre que exista la posibilidad y el espacio para mantener una inclinación máxima de 60°.
- Estabilización de taludes y control de los procesos de arrastre de la escorrentía mientras se desarrolla el material vegetal vivo empleado.
- Control de deslizamientos de tipo planar. Es decir, cuando existe un estrato inestable apoyado sobre otro estrato paralelo estable.

7.3.7.3 Materiales

En los siguientes apartados se describen los materiales a utilizar para realizar el enrejado vivo.

7.3.7.4 Troncos descortezados de madera

Troncos de madera de diámetros comprendidos entre 18 y 25 cm, y una longitud máxima de 6-8 metros.

Se utilizan especies de madera comunes en el lugar de actuación: pino, alerce, falsa acacia, etc. Con objeto de aumentar su durabilidad natural, se recomienda descortezar los troncos. El tamaño, longitud y diámetro varían dependiendo de las técnicas aplicadas y de la disponibilidad en la zona de obras. No es conveniente utilizar eucalipto por su corta durabilidad y dado que sus compuestos producen alelopatía sobre las estacas.

7.3.7.5 Material vegetal vivo de especies autóctonas pioneras con características biotécnicas

En la estructura se implantan estacas vivas de especies leñosas autóctonas, con capacidad de reproducción vegetativa y de emitir raíces adventicias, generalmente de 50 a 150 cm de longitud y con 2 a 7 cm de diámetro. La densidad es de 10-15 estacas por metro lineal.

En el epígrafe 3.3.1. *Materiales vegetales vivos y propiedades biotécnicas se detallan las características biológicas y técnicas de las especies más utilizadas en Bizkaia.*

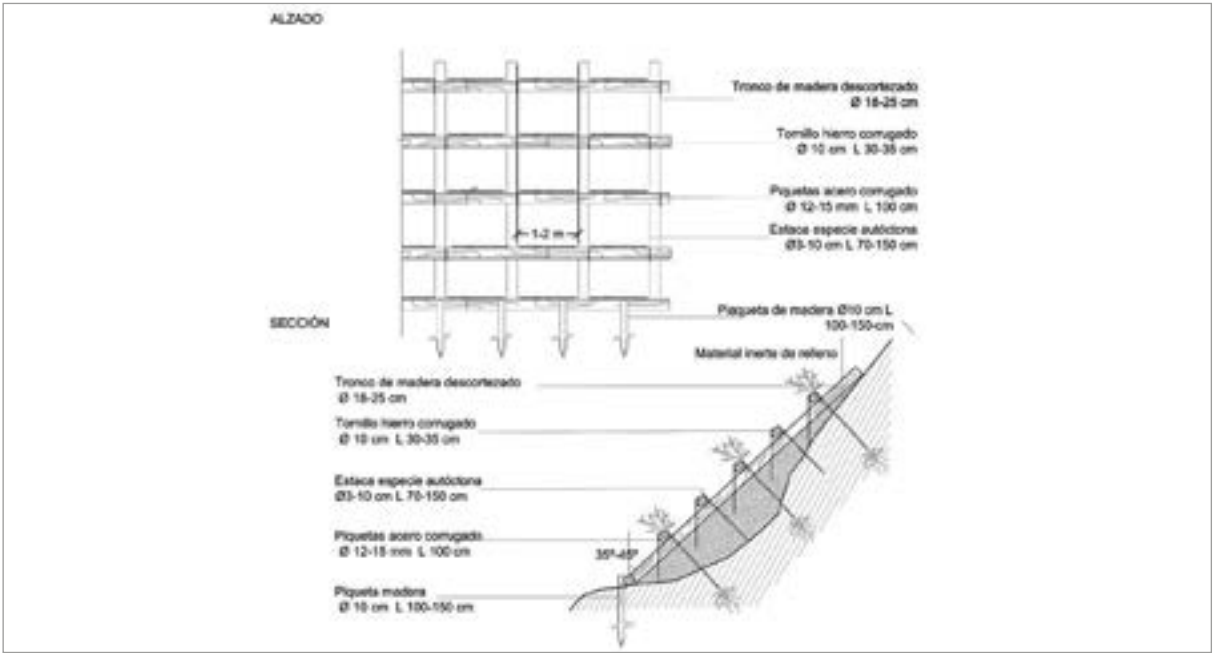
7.3.7.6 Inerte terroso

Con objeto de rellenar los huecos de la estructura y permitir la emisión de raíces adventicias, se utiliza inerte terroso procedente de la propia excavación o bien una mezcla con áridos. En función de las características edáficas, la proporción de ambos componentes puede variar: en suelos permeables la proporción puede llegar hasta el 40 % de tierra de excavación y el 60 % de áridos.

7.3.7.7 Piquetas de acero corrugado

Para la sujeción de los troncos al terreno se emplean piquetas de acero corrugado de 12-14 mm diámetro y 1 m de longitud, o piquetas en madera 8-12 cm de diámetro y 1 m de longitud. Las piquetas de acero son adecuadas en suelos duros y rocosos.

Imagen 169. Enrejado vivo: esquema constructivo. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



7.3.7.8 Clavos o tornillos

Para la fijación de los troncos entre sí se emplean clavos de acero corrugado o tornillos de acero inoxidable especiales para madera de 10 mm de diámetro y 30 cm longitud. En suelos duros y rocosos se deben utilizar grapas o clavos más resistentes e, incluso, bulones o piquetas de acero galvanizado.

7.3.7.9 Semillas para siembra posterior a la ejecución

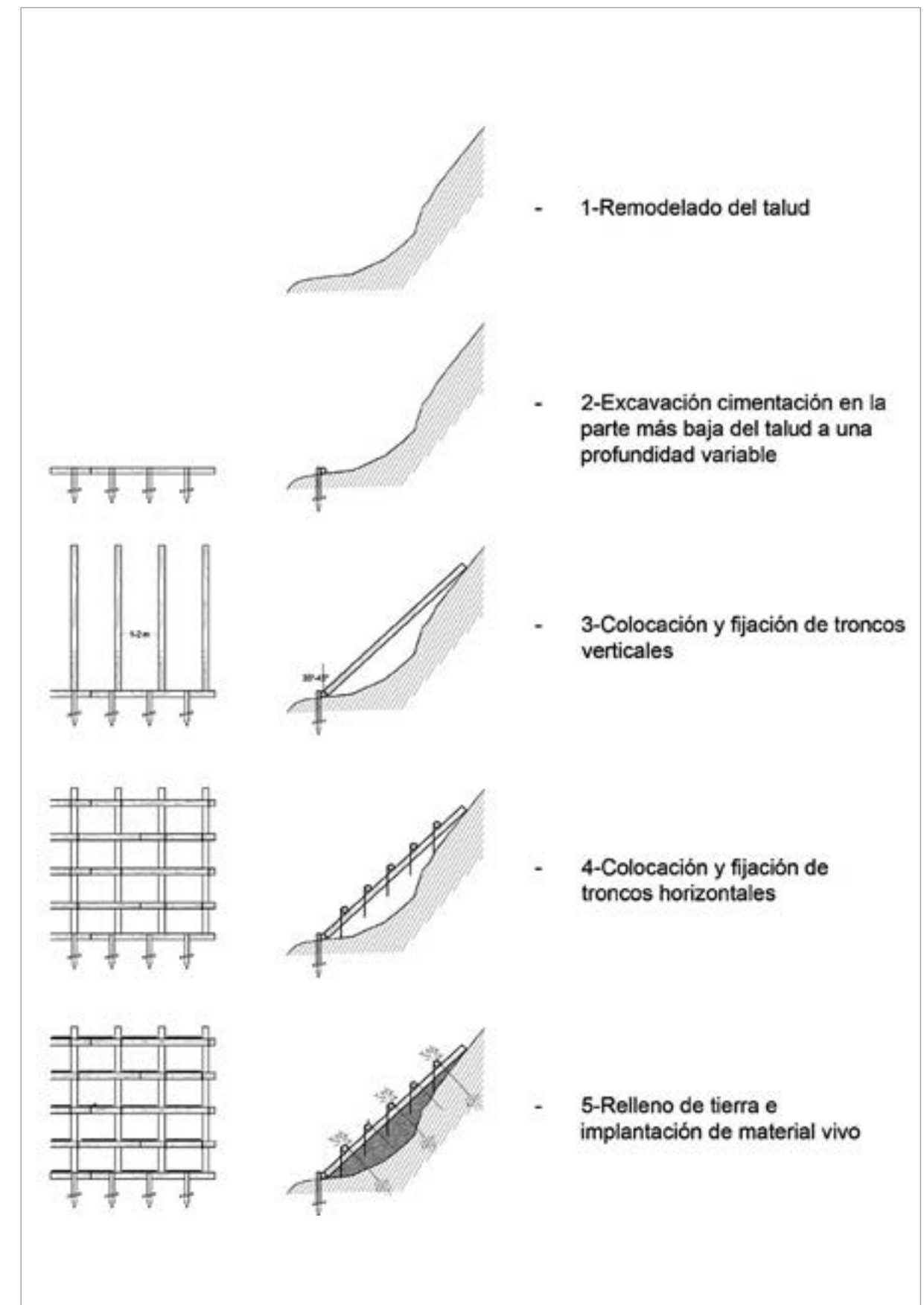
Siembra a voleo o hidrosiembra de una mezcla de semillas de especies herbáceas – de gramíneas y leguminosas – y de especies leñosas, cuya descripción se detalla tanto en el capítulo siembras a voleo como en el capítulo 6.1. *Técnicas de recubrimiento: Siembras por proyección hídrica.*

7.3.7.10 Ejecución de las obras

La ejecución de las obras se realiza siguiendo los siguientes pasos:

1. Remodelado del talud eliminando la presencia de perfiles que impidan la construcción del enrejado.
2. Excavación de la cimentación en la parte más baja del talud a una profundidad variable, dependiendo de la altura del enrejado y del tamaño de los troncos. En el caso de emplear como cimentación un tronco longitudinal, se excava una zanja con una profundidad y anchura del doble del diámetro del tronco. Opcionalmente también se puede utilizar un entramado o bien una escollera como base de esta cimentación estable. En carreteras se emplea también como base una empalizada. Con objeto de aumentar la estabilidad, en la base de la excavación se da una inclinación en contrapendiente hacia el interior del talud.
3. Instalación de la estructura de soporte (entramado, escollera o empalizada) si fuera necesaria. Para su construcción seguir las indicaciones de los capítulos correspondientes.
4. Colocación y fijación de troncos verticales. Los troncos de 20-25 cm de diámetro y de hasta 8 m de longitud se colocan paralelos entre sí, en posición vertical, con la parte basal y más gruesa abajo, y separados unos de otros de 1 a 2 m. La distancia existente entre los troncos longitudinales se calcula en función de la pendiente de la estructura y de las características del terreno. Se colocan apoyados sobre terreno sano en la parte alta del talud y se fija el extremo inferior a la estructura de soporte. Es importante que los troncos verticales estén bien alineados con objeto de facilitar la correcta colocación y fijación de los troncos horizontales.
5. Colocación y fijación de troncos horizontales. Los troncos horizontales se colocan encima de los verticales en ángulo recto separados de 1 a 2 m de distancia entre ellos, fijándolos a los troncos verticales mediante clavos de acero corrugado o tornillos. De esta manera se forma una malla rectangular o cuadrada en función de la inclinación de la pendiente y del tipo de terreno. Mientras se construye y con objeto de que facilitar la construcción, se anchan estos troncos horizontales al terreno mediante barras de acero corrugado que sirven de apoyo.
6. Relleno de tierra e implantación de material vivo. Una vez construida la estructura de madera, se rellena con tierra y se realizan pequeños niveles coincidiendo con los troncos horizontales. En estos niveles se implantan estacas de 50-150 cm de longitud y de 2 a 7 cm de diámetro. La densidad de plantación por nivel se cifra en 10-15 estacas por metro lineal, colocadas estas de tal forma que las yemas terminales se dirijan hacia fuera del talud, estén en contacto con el fondo de la cárcava o excavación y sobresalgan unos 10-20 cm de la superficie frontal del enrejado vivo.
7. Protección de la coronación. Para reducir y controlar la entrada de agua en el talud se recomienda construir una cuneta de guarda, un caballón de interceptación en la cabecera del talud, o proteger los puntos críticos mediante fajinas de drenaje.
8. Siembra o hidrosiembra de toda la superficie.

Imagen 170. Fases del proceso constructivo del enrejado vivo. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



En el caso de la ejecución de las obras de la variante enrejado vivo “vesubio” los puntos 1-3 son iguales. Sin embargo, en los puntos 4 y 5, la estructura del enrejado vivo “vesubio” consta de una serie de empalizadas con 2 o 3 troncos de 8 a 12 cm de diámetro y de 2 a 3 m de longitud, espaciadas alrededor de 2 m en la línea de máxima pendiente. Estos troncos se sujetan con clavos de 16 cm de longitud. En el epígrafe correspondiente a las empalizadas (7.2.4 del presente documento) se explica su construcción. Finalmente, a partir del paso 6 la estructura se ejecuta y termina de forma análoga al enrejado vivo simple.

7.3.7.11 Control de calidad

Madera

Como regla general, en relación con la madera, se cumplirá con los siguientes requisitos:

- Las tolerancias de ejecución no sobrepasarán los valores siguientes:
- Longitud: ± 3 %.
- Diámetro: ± 3 %.
- La madera tendrá certificado SCF.

Material vivo

En el caso del material vegetal vivo, concretamente las estacas o varas, la procedencia será de zonas próximas a la obra. En el caso de planta de vivero se certificará el origen del material, que será preferentemente de Bizkaia. En ambos casos, se considera admisible hasta un 30 % de marras o pérdidas durante el primer año. Se recomienda la realización de ensayos de material vegetal indicados en el epígrafe 7.1 Control de calidad.

7.3.7.12 Medición y abono

El enrejado se mide por metros cuadrados realmente ejecutados y en su medición se considerarán incluidos el suministro y la colocación e integración del elemento vegetal.

7.3.7.13 Recomendaciones

- Tener en cuenta la importancia de la época para la colocación del material y elección de su tipología.
- En pendientes pronunciadas (con inclinaciones superiores a 50°), no conviene superar los 6-8 m de altura para el enrejado. En estos casos, conviene realizar un aterrazado intermedio para utilizar el enrejado por tramos.
- Las estacas vivas deberán tener una longitud que haga que lleguen hasta el terreno situado al trasdós de la obra.
- En casos de pendientes elevadas y como método de contención del material, se puede utilizar en el exterior una red metálica simple o triple torsión.
- La técnica no es apta para estabilización de profundidad.
- Tiene limitaciones en cuanto a la altura a alcanzar (máximo 6-8 metros sin merma) y a la inclinación (en función de la naturaleza del sustrato, máximo 60°). Al pudrirse la madera con el tiempo, el entramado cumplirá con sus funciones estructurales solo si está bien vegetado y las plantas han enraizado adecuadamente.
- Los tiempos de ejecución son importantes.



Imagen 171. Variante enrejado vivo “Vesubio”. Fuente: G. Menegazzi con dibujo de S. Sangalli - SCIA S.L.

7.3.7.14 Propuesta de precio descompuesto: enrejado vivo

Imagen 172. Precio descompuesto de enrejado vivo. Referencia de precios: Base de precios de edificación y urbanización (Gobierno Vasco, 2021)

m2 Enrejado vivo				
Construcción d Enrejado vivo sobre talud formado con troncos de conifera o madera de diámetro entre 18 y25 cm y longitud entre 3 y8 m dispuestos formando una redcula de 1 x1 m sobre un talud entre 40° y60 °, unidos entre si mediante clavos y atados con alambre de acero galvanizado, anclados al terreno con barras de acero corrugado de diámetro 12-14 mm y 1,2 m de largo y relleno de los huecos con tierras de la propia excavación, colocando estacas de especies arbustivas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa, incluyendo el reprellado superficial del talud, el suministro, transporte a pie de obra y corte de los troncos, la construcción de la estructura, la preparación y conservación en obra del material vegetal y el relleno de la estructura.				
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario
1	Materiales			Importe
	m3	Troncos de madera de conifera descortezada diámetro	0,25	81,84 €
	ud	Estaquilla	10,00	0,80 €
	ud	Clavos en acero corrugado	3,00	0,90 €
	ud	Piquetas de madera diámetro 10 cm Longitud 1 metro	2,00	10,00 €
		Subtotal materiales:		51,16 €
2	Equipo y maquinaria			
	h	Camión 10m3 tracción total c/ grúa 16t	0,100	35,00 €
	h	Motosierra	0,080	3,50 €
	h	Retroexcavadora sobre orugas de 180 KW/Arria	0,350	50,14 €
		Subtotal equipo y maquinaria:		21,33 €
3	Mano de obra			
	h	Capataz Obra civil	0,01	24,89 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,50	22,07 €
	h	Peón ordinario construcción	0,80	18,00 €
		Subtotal mano de obra:		25,68 €
4	Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	0,02	47,01 €
Coste de mantenimiento decenal: 18,87€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4):	
			99,11 €	

Imagen 173. Precio descompuesto de enrejado vivo tipo Vesubio. Referencia de precios:
Base de precios de edificación y urbanización (Gobierno Vasco, 2021)

m2 Enrejado vivo tipo Vesubio		Tipo A			
Construcción d Enrejado vivo tipo Vesubio sobre talud formado con troncos de conifera o madera de diámetro entre 15 y 25 cm y longitud entre 3 y 8 m dispuestos formando una redícula de 1 x1 m , los horizontales formando una empalizada de dos troncos sobre un talud entre 40º y 60 º, unidos entre sí mediante clavos y atados con alambre de acero galvanizado, anclados al terreno con barras de acero corrugado de diámetro 12-14 mm y 1,2 m de largo y relleno de los huecos con tierras de la propia excavación, colocando estacas de especies arbustivas autóctonas con capacidad de reproducción vegetativa, incluyendo el repertido superficial del talud, el suministro, transporte a pie de obra y corte de los troncos, la construcción de la estructura, la preparación y conservación en obra del material vegetal y el relleno de la estructura.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	Materiales				
	m3	Troncos de madera de conifera descortezada diámetro	0.40	81.84 €	32.74 €
	ud	Estaquilla	10.00	0.80 €	8.00 €
	ud	Clavos en acero corrugado	4.00	0.90 €	3.60 €
	ud	Piquetas de madera diámetro 10 cm Logitud 1 metro	4.00	10.00 €	40.00 €
		Subtotal materiales:			84.34 €
2	Equipo y maquinaria				
	h	Camión 10m3 tracción total c/ grúa 16t	0.100	35.00 €	3.50 €
	h	Motosierra	0.080	3.50 €	0.28 €
	h	Retroexcavadora sobre orugas de 180 KW Araña	0.350	50.14 €	17.55 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			17.55 €
3	Mano de obra				
	h	Capataz Obra civil	0.05	24.89 €	1.24 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0.60	22.07 €	13.24 €
	h	Peón ordinario construcción.	1.00	18.00 €	18.00 €
		Subtotal mano de obra:			32.49 €
4	Costes directos complementarios				
	%	Costes directos complementarios	0.02	50.04 €	1.00 €
Coste de mantenimiento decenal: 18.87€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4):		135.37 €

7.3.7.15 Cálculo

Esta técnica se utiliza para la consolidación y estabilización superficial de laderas sometidas a procesos de erosión y a deslizamientos superficiales; así pues, para su correcta ejecución es necesario conocer la profundidad del estrato inestable, esto permitirá un buen diseño tanto del número como de la profundidad de los anclajes del enrejado. Así mismo, es necesario aportar un buen apoyo en el pie del enrejado, que se puede conseguir mediante dos troncos horizontales que constituyan un entramado de madera. El cálculo que se presenta a continuación es válido para ambos tipos de enrejado presentados en este manual.

En el epígrafe 6.3. Estabilidad de las laderas vegetadas: papel de la vegetación en la estabilidad se muestran los modelos de refuerzo de suelo y raíces. En el capítulo 3.2 *El enfoque y la estrategia en la obra de bioingeniería. Fases de la vida de servicio de la obra de bioingeniería* se desarrollan los modelos de deterioro de los troncos de madera empleados en la obra.

Un aspecto importante en el cálculo de esta técnica es el número necesario de anclajes al terreno, siendo mayor a medida que la inclinación y longitud de la ladera aumente, y cuanto más profunda e inestable sea la capa de suelo que se quiere estabilizar.

Para el diseño de este tipo de estructuras son necesarios los siguientes cálculos:

- Determinación de los parámetros resistentes del terreno (cohesión y ángulo de fricción interna).
- Determinación del peso específico del terreno.
- Cálculo del coeficiente de empuje activo del terreno.

Los parámetros resistentes del terreno se calcularán mediante ensayos geotécnicos y ensayos de laboratorio (por ejemplo, ensayos de resistencia a cortante). El cálculo de los coeficientes de empuje se explica en el epígrafe 6.2 *Geotécnia aplicada a la bioingeniería*.

7.3.7.16 Distancia entre troncos horizontales

La distancia entre los troncos horizontales del enrejado depende de las características del terreno y de la tipología del enrejado. Para el caso de un enrejado simple (pared de la jaula formada por un único tronco), tenemos las siguientes expresiones:

a. Caso de un terreno granular (no cohesivo):

$$l = \frac{h}{tg(\alpha - \phi)}$$

Donde:

l: distancia entre troncos horizontales.

h: diámetro del tronco.

α: ángulo de la pendiente de la ladera.

φ: ángulo de fricción interna del terreno.

b. Caso de terreno cohesivo:

En este caso, el cálculo de la distancia entre troncos horizontales utiliza la altura crítica de la ladera (calculada según Taylor, 1948). Las expresiones en este caso son las siguientes:

$$H_c = \frac{N_s \cdot c_u}{\gamma}$$

Donde:

H_c: altura crítica de la ladera (con Factor de Seguridad=1).

c_u = cohesión no drenada (kPa).

γ: peso específico del terreno (kN/m³).

N_s: factor de estabilidad (Menegazzi recomienda utilizar un valor de 5,52).

Una vez calculada la altura crítica, la distancia entre troncos horizontales se calcula de acuerdo con:

$$L = \frac{D}{\tan \alpha} + \frac{H}{\operatorname{sen} \alpha}$$

Donde:

L: distancia entre troncos horizontales (m).

D: diámetro del tronco (m).

H: altura crítica según Taylor para un factor de seguridad de 1,5 (H = H_c/1,5).

α: inclinación de la ladera.

En Menegazzi & Palmeri (2013) aparece desarrollada la explicación teórica de los anteriores cálculos; así como, la justificación de las fórmulas empleadas.

7.3.7.17 Cálculo de la estabilidad externa

Dada la configuración del enrejado y la formación de jaulas, no son necesarias las comprobaciones a deslizamiento ni a vuelco. Las comprobaciones a realizar para asegurar la estabilidad de la estructura son la comprobación al arranque de los anclajes y las comprobaciones de estabilidad interna de los troncos empleados. Con

las anteriores comprobaciones, el conjunto de la estructura se mantiene estable. En este epígrafe se realizan las comprobaciones de estabilidad externa.

Cálculo de la longitud del anclaje del enrejado

El enrejado se ancla al terreno mediante troncos/estacas verticales de 8-12 cm de diámetro y longitud mínima de 1 m o redondos de acero de 200 mm de diámetro. Si el terreno lo permite, se recomienda el uso de la primera opción (uso de estacas de madera).

Para el cálculo de la longitud de anclaje se utiliza la siguiente expresión:

$$Rak = \pi \cdot D \cdot \gamma \cdot d2 \cdot L \cdot K \cdot \tan \phi + c \cdot \pi \cdot D \cdot L$$

Donde:

- Rak: resistencia característica al arranque (kN).
- D: diámetro del anclaje (m).
- d2: profundidad media del anclaje (m) (ver imagen 174).
- L: longitud de la zona de anclaje en el interior de la zona estable de la ladera (m).
- K: coeficiente de empuje activo.
- c: cohesión del terreno (N/m³).
- γ: peso específico del terreno (N/m³).
- φ: ángulo de fricción interna de terreno (°).

La resistencia necesaria al arranque se supondrá igual al peso del terreno que ha de soportar cada anclaje. Despejando la longitud (L) de la anterior fórmula, se obtendrá la longitud necesaria de anclaje en la parte de terreno estable.

En Menegazzi & Palmeri (2013) aparece desarrollada la explicación teórica de los anteriores cálculos; así como, la justificación de las fórmulas empleadas. Además, en la página web <http://www.aipin.it/pubblicazioni/>, se puede descargar un documento Excel denominado “Grata viva” en el que los anteriores cálculos están ya automatizados.

7.3.7.18 Cálculo de la estabilidad interna (comprobación a flexión y a cortante

En la imagen 175 se muestra la notación empleada para los diferentes elementos de un enrejado.

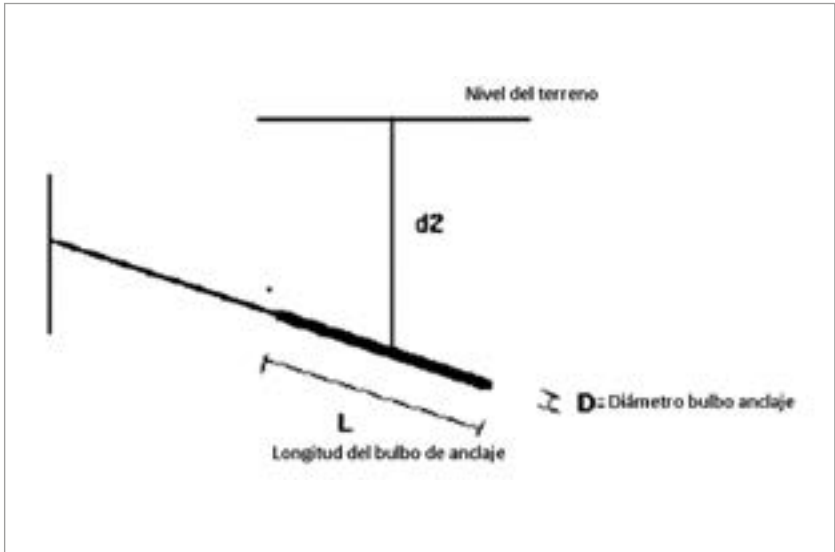


Imagen 174. Significado de algunos términos de la fórmula de comprobación al arranque. Fuente: Menegazzi & Palmeri, 2013

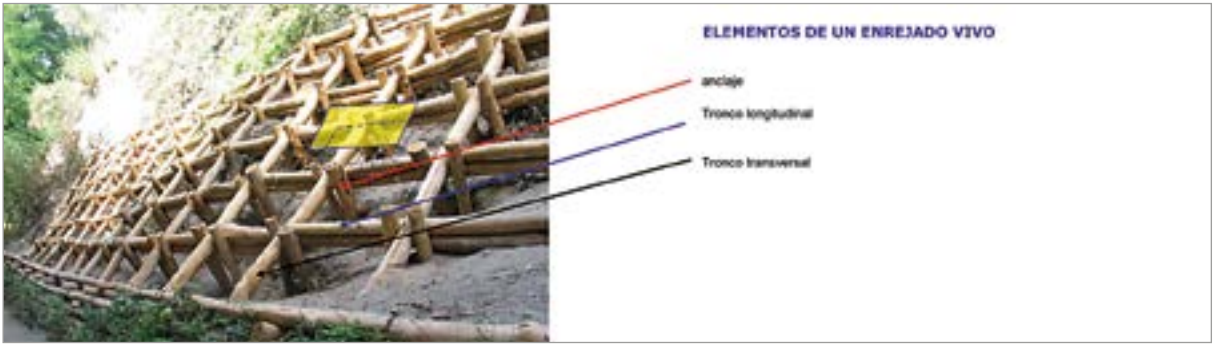


Imagen 175. Elementos de un enrejado vivo. Fuente: Gino Menegazzi (adaptada)

Los valores de cálculo de la resistencia a flexión y a cortante se obtienen a partir de la siguiente expresión:

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M}$$

Donde:

- k_{mod}: factor que tiene en cuenta las condiciones de servicio de la madera utilizada. En general, dado que la madera está en contacto con el terreno, adoptará un valor igual a 0,5.
- γ_M: factor de minoración de la resistencia. Para el caso de cargas permanentes se utilizará un valor de 1,3.
- f_{v,k}: valor característico de la resistencia de la madera (a flexión o a cortante).
- f_{v,d}: valor de cálculo de la resistencia de la madera (a flexión o a cortante).

Comprobación a flexión

Para esta comprobación, el primer paso consiste en determinar la distancia intereje de los troncos longitudinales. Esta viene definida por la separación de los anclajes de los troncos longitudinales.

De acuerdo con la teoría clásica de cálculo de estructuras, se calcula la carga lineal que soporta el tronco representándolo como una viga biapoyada con apoyos no empotrados. La carga lineal se calcula a partir del peso del terreno comprendido en la jaula definida en la configuración del enrejado. Esta carga lineal (q) se calculará por metro lineal de tronco longitudinal (kN/m). El espesor del volumen de terreno estabilizado en cada jaula dependerá de la tipología de enrejado utilizado. En general, para un enrejado simple, el espesor será igual al diámetro del tronco longitudinal. En el caso del enrejado tipo “vesubio”, el espesor será igual a la suma de los diámetros que definen las paredes de las jaulas del enrejado.



Imagen 176. Enrejado vivo “vesubio”. Fuente: Gino Menegazzi

Dimensiones de la jaula definida por la configuración de la estructura del enrejado.

En la imagen, se muestra con líneas de distinto color, la anchura, longitud y altura de una de las jaulas: altura en línea amarilla, anchura en línea roja y longitud en línea azul. El volumen de tierra estabilizado en cada jaula permite calcular la carga lineal que soportan los troncos longitudinales.

(Menegazzi & Palmeri, 2013).

La expresión a utilizar para la condición de comprobación es:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_{adm}} \leq \sigma_{adm}$$

Donde:

$\sigma_{\max}$: tensión máxima soportada por el tronco horizontal (kN/m²).

$M_{\max}$: momento máximo sobre el tronco horizontal (kN·m). El tronco se asimila a una viga biapoyada.

σ_{adm} : resistencia a flexión del tronco horizontal (kN/m²).

W: módulo resistente del tronco que se calcula de la siguiente manera:

$$W = \frac{\pi \cdot D^3}{32}$$

Donde:

D: diámetro del tronco (m).

Esta misma comprobación se tendrá que hacer para el caso de las estacas verticales. En este caso, el valor máximo de la carga lineal (q) se dará en el punto de entrada del anclaje en el terreno estable de la ladera. El elemento se podrá asimilar al caso de una viga empotrada en uno de sus extremos y el valor del momento máximo será de:

$$M_{\max}(kN \cdot m) = \frac{q \cdot L^2}{15,59}$$

Donde q representa la carga lineal calculada a la profundidad a la que comienza la capa estable de la ladera.

Comprobación a cortante

Respecto al cortante (V) al que están sometidos los troncos horizontales, en los apoyos extremos se da un cortante de $0,375 \cdot q \cdot l$ y en el apoyo central tendremos un cortante de $0,625 \cdot q \cdot l$ con la sección completa. Esta última sección es la más desfavorable.

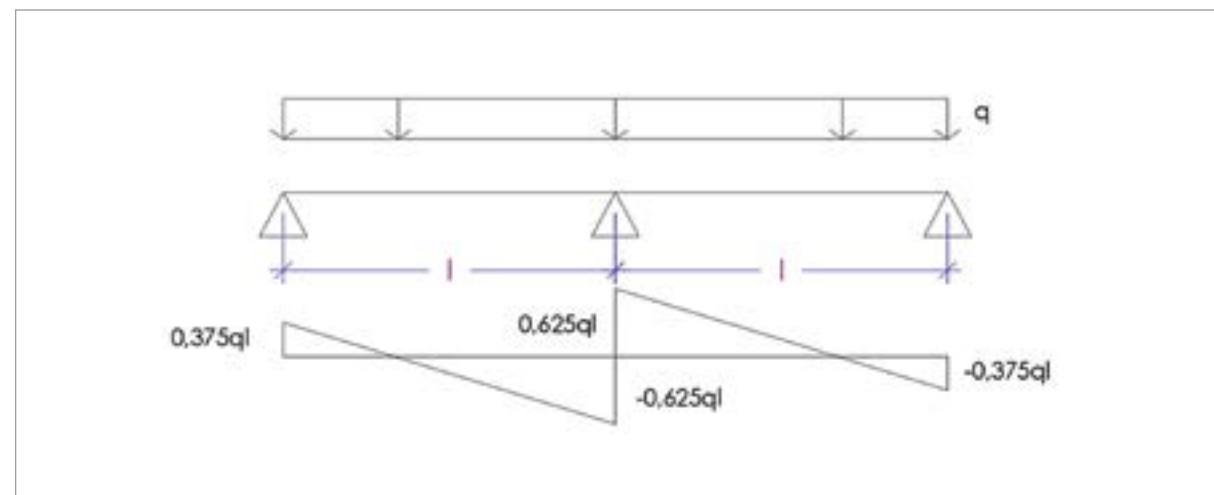


Imagen 177. Distribución de esfuerzos cortantes en puntos extremos y punto central de una viga continua biapoyada

La tensión máxima a cortante considerando un factor que tiene en cuenta la posible fenda kcr (0,5) se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\tau_d = \frac{4}{3} \cdot \frac{V_d}{k_{cr} \cdot A}$$

Donde:

τ_d : tensión máxima de cortante (N/mm²).

A: sección del tronco (mm²).

La resistencia al cálculo para el cortante será:

$$f_{V,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{V,k}}{\gamma_M} = 0,5 \cdot \frac{f_{V,k}}{1,3}$$

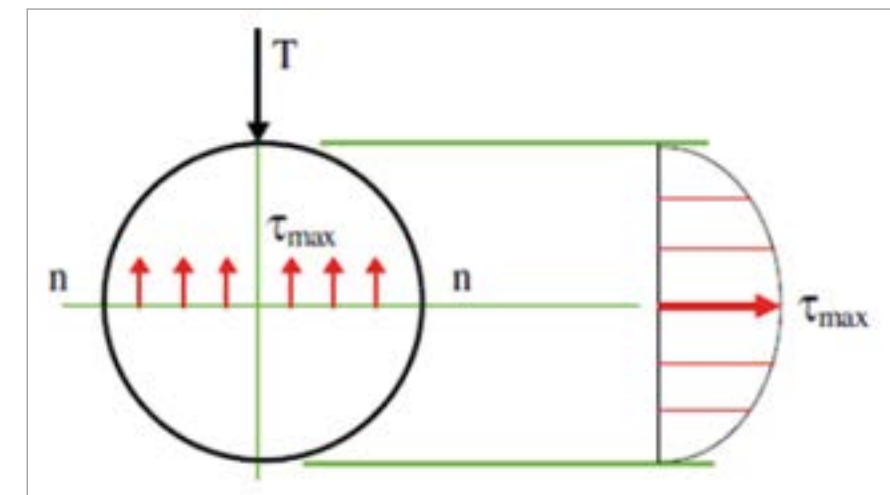


Imagen 178. Máxima tensión a cortante de una pieza de sección circular

La expresión a utilizar para la condición de comprobación es:

$$\tau_d \leq f_{V,d}$$

En Menegazzi & Palmeri (2013) aparece desarrollada la explicación teórica de los anteriores cálculos, así como la justificación de las fórmulas empleadas.

Además, en la página web <http://www.aipin.it/publicazioni/>, se puede descargar un documento Excel denominado "Grata viva" en el que los anteriores cálculos están ya automatizados.

7.3 TÉCNICAS MIXTAS

7.3.8 Bajantes escalonadas



Imagen 179. Bajante en piedra y madera. Adaptación de la cuneta con saltos y su evolución en el tiempo. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.

7.3.8.1 Definición y alcance

En este capítulo se abordan las bajantes escalonadas basadas en técnicas de bioingeniería para la construcción de infraestructuras lineales. Una bajante es, tal y como se define en la norma N5.2-IC del MITMA, un elemento lineal, superficial, ubicado en las márgenes (taludes de desmonte o espaldones de rellenos) para la conducción de caudales de agua de escorrentía, generalmente por líneas de máxima pendiente, con resaltos y cambios de régimen hidráulico.

La alimentación en cabeza se realiza a través de un elemento puntual (por ejemplo, una arqueta o arquetón), desde cunetas/cauces o directamente desde superficies vertientes. El agua se conduce a un punto inferior situado varios metros más abajo y, a lo largo del recorrido, se distribuyen saltos de agua. Esta solución permite reducir considerablemente la distancia de transporte y la energía transportada; así mismo, protege las calzadas viarias del agua y favorece su filtración.

Por lo general, la bajante no lleva impermeabilización salvo excepciones. El uso de lámina de impermeabilización por debajo de la bajante se limita a los siguientes casos:

- Rellenos: cuando se hayan utilizado materiales marginales para la ejecución del relleno y cuando se prevean asientos tras la construcción que puedan provocar roturas o colapsos de taludes.
- Desmontes: cuando se prevean movimientos que puedan provocar roturas o deslizamientos.

Las bajantes escalonadas en bioingeniería presentan limitaciones en cuanto a la altura de los saltos y a la ocupación del terreno.

Existen diversos tipos de bajantes, siendo, generalmente, derivaciones de las cunetas de piedra y madera, o de una combinación de cunetas y diques de piedra y madera. En este capítulo se presenta la bajante de cuneta de piedra y madera.

a) Bajante escalonada de piedra y madera: adaptación de la cuneta de piedra y madera con laterales de entramado

La construcción es similar a la cuneta de piedra y madera con laterales en madera, pero presentando saltos contruidos con troncos de madera de una longitud máxima de 80 cm.

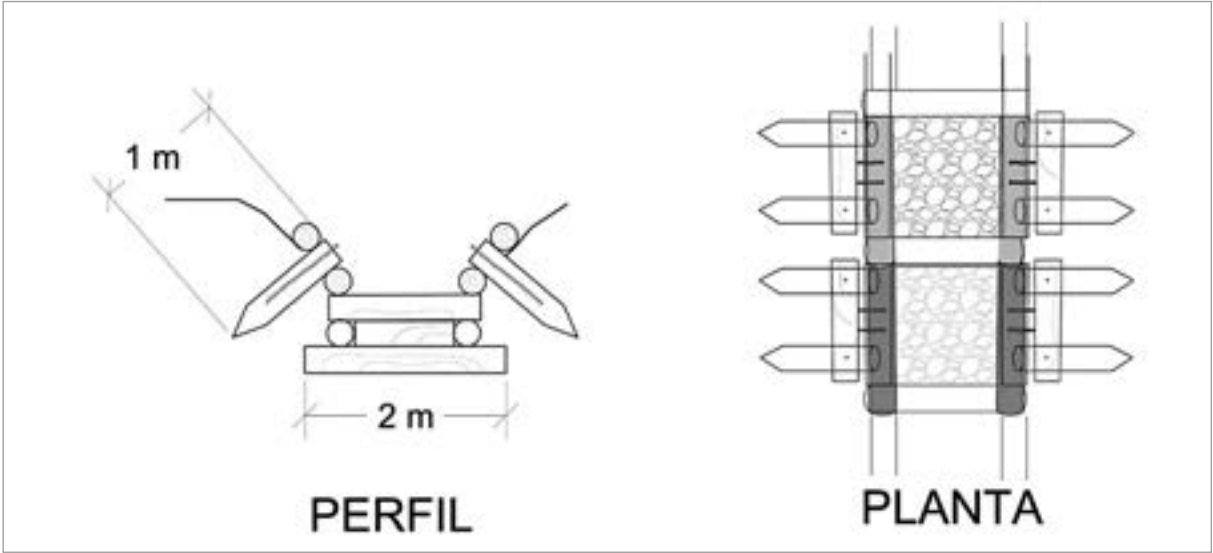


Imagen 180. Bajante escalonada. Fuente: S. Sangalli-SCIA S.L.

b) Bajante de piedra y madera con cajero simple

Se trata de una variante simplificada que solo se puede utilizar en pequeñas distancias o como cabeza o conexión de la bajante. Tal y como se define en la norma N5.2-IC, la bajante consta de los siguientes elementos:

- **Cabeza o conexión con el elemento que desagua a la bajante:** se debe disponer por encima de la arista de coronación del talud. Debe tener forma abocinada para recoger el caudal que cambia de dirección y con altura de cajeros suficiente para evitar desbordamientos.
- **Cuerpo o canal de descarga:** situado en la línea de máxima pendiente y provisto de cajeros con resguardo suficiente para evitar desbordamientos. Puede requerir elementos de disipación de energía.
- **Pie o conexión con el elemento que desagua la bajante:** debe disponerse por debajo de la arista de pie de talud. Debe tener forma abocinada para favorecer una expansión del caudal. Puede requerir elementos de disipación de energía y altura de cajeros suficiente (resguardo) para evitar desbordamientos.



Como principales ventajas de esta técnica se incluyen las siguientes:

- En este tipo de soluciones, las plantas contribuyen tanto a estabilizar la estructura de madera como a mejorar el drenaje del suelo mediante la absorción del agua y la evaporación de esta (procesos y efectos de la evapotranspiración). Este proceso permite la disminución de la presión hidrostática en el terreno (presión de poro) y la reducción de la humedad del suelo, reduciendo, a su vez, el peso de este. Todos los anteriores efectos aumentan la estabilidad del terreno.
- La evolución de las bajantes es la de convertirse en estructuras estables con una configuración similar a un torrente. Esto facilita que el drenaje de la ladera sea más natural.

Imagen 181. Bajante en piedra y madera con cajero simple

7.3.8.2 Aplicaciones

Las bajantes escalonadas se emplean con efectividad en los siguientes casos:

- Para la recogida del agua y el drenaje de las infraestructuras lineales, por lo general en líneas de máxima pendiente.
- Preferiblemente en zonas cuya precipitación media anual, obtenida de la serie histórica de los últimos treinta (30) años, sea superior a seiscientos milímetros (600 mm).

7.3.8.3 Materiales

En los siguientes apartados se describen los materiales a utilizar para construir una bajante escalonada.

7.3.8.4 Troncos descortezados de madera

Troncos de madera de diámetros comprendidos entre 18 y 25 cm. Se utilizarán especies de madera comunes en el lugar de actuación: pino, alerce, falsa acacia, etc. Con objeto de aumentar su durabilidad natural, se recomienda descortezar los troncos. El tamaño, longitud y diámetro varían dependiendo de las técnicas aplicadas y de la disponibilidad en la zona de obras.

7.3.8.5 Material vegetal vivo de especies autóctonas pioneras con características biotécnicas

Se emplean normalmente estacas o varas vivas no ramificadas de diferentes especies, procedentes de la vegetación autóctona pionera, a colocar entre los intersticios de los bloques, de la parte alta de la escollera, con longitud suficiente para llegar a contactar y enraizar en el suelo natural (de 1 m a 1,5 m de longitud y de 3 a 10 cm de diámetro). De cara a incrementar la biodiversidad del material vegetal empleado, se recomienda la utilización de varias especies a lo largo del cuerpo de la escollera.

La vegetación debe utilizarse en periodo de parada vegetativa extendida: de finales de octubre a primeros de abril. La densidad adecuada es de 2-5 plantas/m², dependiendo de las condiciones y especies utilizadas: a mayor tamaño final, menor densidad. En caso de no poder realizarse en el periodo detallado, se puede utilizar planta en alveolo forestal de 2 a 3 savias en contenedor forestal de 1000 cc hasta 2000 cc. Solo se aconseja el empleo de especies con capacidad de emitir raíces adventicias, principalmente salicáceas y, preferiblemente, fuera de periodo de sequías. En este caso, la densidad mínima adecuada es de 2 plantas en contenedor forestal por m².

En el epígrafe 3.3.1. *Materiales vegetales vivos y propiedades biotécnicas* se detallan las características biológicas y técnicas de las especies más utilizadas en Bizkaia.

7.3.8.6 Tierra de excavación o inerte terroso

Con objeto de rellenar los huecos de la estructura y permitir la emisión de raíces adventicias, se utiliza el material procedente de la propia excavación de la bajante. En función de las características edáficas, se puede mejorar la estructura añadiendo áridos. En este caso, la proporción de ambos componentes puede variar: en suelos permeables la proporción puede llegar hasta el 40 % de tierra de excavación y el 60 % de áridos.

7.3.8.7 Lajas y piedras para enchado

Las lajas y piedras son utilizadas para el enchado del lecho de las cunetas. Se utilizan piedras de un tamaño comprendido entre 10 y 30 cm de diámetro o lajas de piedra del mismo tamaño, y un espesor de 2 a 5 cm.

7.3.8.8 Piquetas de acero corrugado

Para la sujeción de los troncos al terreno se emplean piquetas de acero corrugado de 12-14 mm de diámetro y 1 m de longitud.

7.3.8.9 Clavos o tornillos

Para la fijación de los troncos entre sí se emplean clavos de acero corrugado o tornillos de acero inoxidable especiales para madera de 10 mm de diámetro y 30 cm longitud.

7.3.8.10 Impermeabilización

En los casos en los que se necesite impermeabilizar la cuneta, cualquiera que sea el tipo constructivo, esta consistirá en un paquete compuesto por geotextil, EPDM y manta de bentonita sódica colocada bajo la construcción de la bajante.

7.3.8.11 Siembras a voleo o hidrosiembras

Siembras de gramíneas y herbáceas bien a voleo para superficies pequeñas bien mediante la técnica de hidro-siembra. Generalmente se llevan a cabo en las superficies de unión entre los entramados y la base de la bajante.

7.3.8.12 Bajante en piedra y madera

Para su ejecución se recomienda la utilización de un tipo de excavadora denominada araña, y debe de prepararse siguiendo los siguientes pasos:

1. Excavación mediante maquinaria de una zanja cuya anchura y profundidad coincidan con la bajante y la longitud del salto que se desea construir.

Apertura de zanjas transversales de 20-25 cm de anchura (diámetro del tronco) y 2-4 m de longitud, con una distancia entre zanjas de 2 m, para permitir:

- La colocación de un tronco de madera transversal (a). Dicho tronco se apuntalará mediante barras de acero corrugado colocadas a favor de la pendiente.
- Sobre estos troncos transversales se clavan los troncos longitudinales colocados en dos o en cuatro hileras en función del caudal y del salto (b).
- Sobre la última hilera de troncos longitudinales se colocan y clavan al terreno lateral troncos transversales con punta colocados cada dos metros (c).
- Sobre éstos últimos se clava la última fila de troncos longitudinales (d).

El fondo de la bajante irá relleno de lajas de piedras para lo cual se colocarán troncos transversales que permitan su acumulación densa.

2. El salto se construye colocando dos, tres y hasta cuatro hileras de troncos transversales.

3. Revegetación de la estructura: Con objeto de aumentar la estabilidad de la obra, se emplea material vegetal colocado en las cámaras/jaulas del entramado así formado. En el caso de que el agua pueda llegar hasta este nivel, se emplean fajinas para rellenar esta cámara. Por el contrario, si el nivel hídrico es más bajo, en las cámaras laterales se colocan estacas o plantas enraizadas con o sin tierra.

4. La revegetación de los laterales se puede realizar mediante una hidrosiembra o siembra a voleo si su pendiente es baja. Se llevará a cabo desde el punto más bajo hacia aguas arriba de manera que el perfil se vaya adaptando a la pendiente. En el supuesto de que la bajante deba estar impermeabilizada, se procederá a colocar el geotextil y las láminas impermeabilizantes por debajo de la misma.



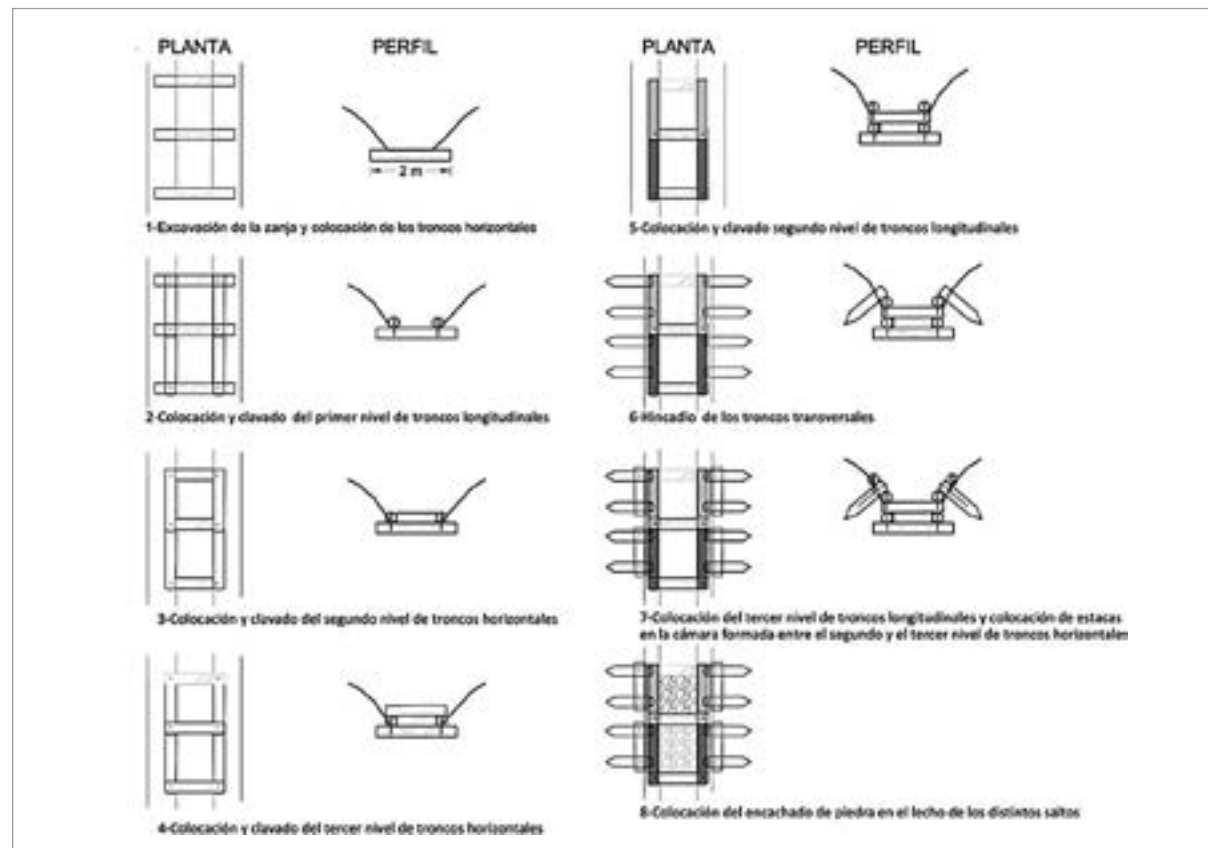


Imagen 182. Fases del proceso constructivo de la bajante escalonada. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.

7.3.8.13 Bajante de piedra y madera con cajero simple

Utilizada en pequeños trayectos o como cabeza de bajante. Para su preparación se deben seguir los pasos:

1. Excavación mediante maquinaria de una zanja cuya anchura y profundidad coincidan con la bajante y la longitud del salto que se desea construir.
2. Colocación de troncos transversales sujetos con barras de acero corrugado.
3. Colocación y clavado de troncos longitudinales dando forma abocinada de arriba a abajo.
4. Colocación de enchado de piedras.
5. La revegetación de los laterales se realiza mediante hidrosiembra y estaquillado junto a los troncos longitudinales.

El sentido de avance de la obra es desde el punto más bajo hacia aguas arriba de manera que se pueda ir adaptando y consiguiendo el perfil y la pendiente buscada. En el supuesto de que la bajante deba estar impermeabilizada, se procederá a colocar el geotextil y las láminas impermeabilizantes por debajo de la misma.

7.3.8.14 Control de calidad

Se llevará a cabo un control de calidad de los materiales, bloques de Piedra, madera y vegetación en función de la tipología construcción de acuerdo con lo indicado en el epígrafe 7.1. *Control de calidad.*

7.3.8.15 Medición y abono

Las bajantes se medirán por metros lineales realmente ejecutados, y en su medición se considerarán incluidos el suministro, la colocación y la revegetación.



Imagen 183. Bajante en piedra y madera con cajero simple. Fuente: F. Florineth

7.3.8.16 Recomendaciones

- Tener en cuenta la importancia de la época para la colocación del material y elección de su tipología.
- Comprobar que se rellena y compacta adecuadamente los huecos entre los bloques o entre los troncos de madera.
- Aviverar el material en obra y utilizar solo el material necesario. En el caso de emplear planta enraizada en alveolo es posible que se requiera riego de apoyo durante los primeros meses.
- Para pendientes mayores del siete por ciento ($i > 7\%$) será preciso adoptar precauciones especiales contra la erosión, como, por ejemplo, disponer escalones para disipar la energía del agua, o aumentar la rugosidad con paramentos irregulares.

Sigue ►►►

Viene de la página anterior ►►►

- En los cambios de dirección en planta y puntos de confluencia de bajantes, se deben disponer sobreelevaciones de los cajeros laterales u otras medidas para evitar desbordamientos.
- La comprobación hidráulica de las bajantes se debe efectuar normalmente en régimen variable.
- Las sobreelevaciones adoptadas en puntos de cambio de dirección y confluencias de elementos (pie, cuerpo o cabeza) deben justificarse por métodos empíricos o calcularse en régimen variable.
- Cobra especial importancia la definición de las especies y material vegetal vivo a emplear, en función de las condiciones ambientales y vegetación del lugar, teniendo como criterio básico que no merme las condiciones de visibilidad y seguridad de la circulación vial. En este sentido, se debieran estudiar los emplazamientos donde se ubiquen de manera que la función ecológica y la integración paisajística no interfieran en los requerimientos de seguridad vial.
- Las bajantes naturalizadas se deben realizar en aquellas zonas donde se pueda garantizar un mantenimiento de forma segura. Las zonas donde esto no sea viable pueden albergar cunetas de hormigón con escapes de fauna de bioingeniería, relleno de lechos con piedra y estaquillados laterales.
- Las bajantes en las zonas de relleno o zonas inestables se deben impermeabilizar. La impermeabilización de la cuneta se lleva a cabo con lámina de EPDM o polietileno, o bentonita.
- Todos los tipos de canaletas y bajantes, aunque se ejecuten adecuadamente, pueden sufrir daños tras sufrir un fuerte evento climatológico. Los dos principales problemas que pueden comprometer sustancialmente la funcionalidad de estas estructuras son:
 - La interrupción de la continuidad de la obra a causa de alguna rotura. Esta, normalmente, se produce por el hundimiento de los márgenes laterales debido a la saturación de la capa superficial del terreno (de la ladera), o cuando el transporte de agua es tal que moviliza también la parte baja de la canalización.
 - Sifonamiento o tubificación que provoca que el agua no entre en la canalización, excavando la base y rellenos de la bajante. Este fenómeno puede producirse también en las canaletas de hormigón o de acero.

Asimismo, se pueden dar otro tipo de problemas asociados a:

- La falta de resistencia de las canaletas realizadas con troncos de madera colocados unos junto a otros, especialmente si no han sido descortezados.
- La pudrición de la madera, especialmente si esta no ha sido descortezada.
- El posicionamiento erróneo de la canaleta con respecto a la ladera y al flujo de las aguas. Canaletas colocadas sobreelevadas normalmente sufren fenómenos de sifonamiento. Canaletas demasiado hundidas sufren normalmente problemas de enterramiento.
- La ausencia de estabilización de las márgenes o mala conexión de la estructura con las superficies laterales.

7.3.8.17 Propuesta de precio descompuesto: bajante escalonada

ml Bajante en madera y piedra					
Construcción de bajante escalonada a en madera y piedra con cajeros laterales en madera , salto de dos troncos y dimensiones de 1 metro de anchura y 1 metro de longitud, y salto de 40 cm de altura ,colocados con retroexcavadora sobre cadenas colocación de material vegetal y relleno de los huecos existentes entre los bloques inerte terrazo					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
	m3	Troncos de madera de conifera descortezada diámetro 18-25 cm	1,33	81,84 €	108,85 €
	t	Piedra de relleno	0,40	8,00 €	3,20 €
	ud	Estaquilla e plantel en obra	4,00	2,70 €	10,80 €
	ud	Claves en acero corrugado	5,00	0,90 €	5,40 €
	ud	Piquetas en acero corrugado	2,00	5,00 €	10,00 €
		Subtotal materiales:			138,25 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Retroexcavadora sobre orugas de 180 kW	0,15	50,14	7,52 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			7,52 €
3		Mano de obra			
	h	Capataz Obra civil	0,05	24,89 €	1,24 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,40	22,07 €	8,83 €
	h	Peón ordinario construcción	0,70	18,00 €	12,60 €
		Subtotal mano de obra:			22,67 €
4		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	0,02	30,19 €	3,68 €
Coste de mantenimiento decenal: 18,87€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4):		168,44 €

*En caso de utilizar una excavadora de tipo araña, el precio por ml se incrementa en 5 euros.

Imagen 184. Precio descompuesto de bajante escalonada en madera y piedra
Referencia de precios: Base de precios de edificación y urbanización (Gobierno Vasco, 2021)

ml Bajante en madera y piedra con cajero simple					
Construcción de bajante escalonada a en madera y piedra con cajeros laterales en madera , salto de dos troncos y dimensiones de 1 metro de anchura y 1 metro de longitud, y salto de 40 cm de altura ,colocados con retroexcavadora sobre cadenas colocación de material vegetal y relleno de los huecos existentes entre los bloques inerte terrazo					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
	m3	Troncos de madera de conifera descortezada diámetro 18-25 cm	0,37	81,84 €	30,28 €
	t	Piedra de relleno	0,25	8,00 €	2,00 €
	ud	Estaquilla e plantel en obra	4,00	2,70 €	10,80 €
	ud	Claves en acero corrugado	4,00	0,90 €	3,60 €
	ud	Piquetas en acero corrugado	2,00	5,00 €	10,00 €
		Subtotal materiales:			56,68 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Retroexcavadora sobre orugas de 180 kW	0,10	50,14	5,01 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			5,01 €
3		Mano de obra			
	h	Capataz Obra civil	0,05	24,89 €	1,24 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,10	22,07 €	2,21 €
	h	Peón ordinario construcción	0,40	18,00 €	7,20 €
		Subtotal mano de obra:			10,65 €
4		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	0,02	15,67 €	3,14 €
Coste de mantenimiento decenal: 18,87€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4):		72,35 €

*En caso de utilizar una excavadora de tipo araña, el precio por ml se incrementa en 5 euros.

Imagen 185. Precio descompuesto de bajante escalonada.
Referencia de precios: Base de precios de edificación y urbanización (Gobierno Vasco, 2021)

7.3.8.18 Cálculo

A lo largo del recorrido del agua por la bajante escalonada, se pueden producir los siguientes regímenes hidráulicos:

- UF: régimen uniforme.
- GVF: flujo gradualmente variado.
- RVF: flujo de variación rápida.

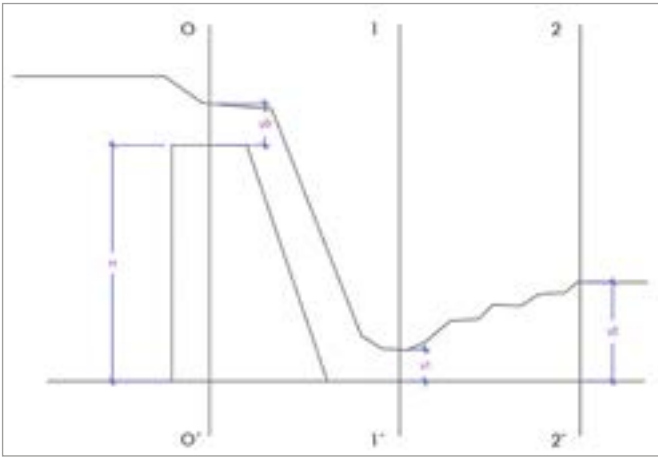


Imagen 186. Secciones de control del resalto hidráulico. Las variables y1 y y2 representan los calados conjugados del fenómeno del resalto

En la boca del aliviadero, justo antes de caer el agua de un nivel a otro, se cumple la condición de flujo crítico (número de Froude = 1). El calado crítico se calcula de la siguiente manera:

$$y_c = \left(\frac{Q^2}{b^2} \right)^{1/3}$$

Donde:

- Q: caudal (m³/s).
- y_c: calado crítico (m).
- b: anchura cauce o vertedero (m).
- g: constante de la gravitación universal (m/s²).

En la imagen sobre estas líneas se muestran las típicas variables que definen un resalto hidráulico (calados y velocidades conjugadas, secciones de control, etc.).

En el paso de la sección O-O´ a la sección 1-1´ el flujo pasa de régimen crítico a rápido por lo que no existe pérdida de carga y se puede aplicar la ecuación de conservación de la energía (Bernoulli). La línea de energía en la sección de control 1 (base de la caída) es:

$$H_1 = H + \frac{3}{2} y_c$$

(Corresponde a la energía potencial del agua antes de caer)

Donde:

- H: altura del dique o barrera transversal (m).

Para los cálculos se pueden incluir distintas alturas de caída. La longitud mínima de salto permitirá el desarrollo del fenómeno de resalto hidráulico.

Aplicando la ecuación de conservación de la energía y desarrollando la expresión, obtenemos:

$$H + \frac{3}{2} y_c = y_1 + \frac{Q^2}{b^2 y_1^2 2g}$$

(A partir de esta expresión calculamos el valor de y1)

Donde:

- Q: caudal de entrada (m³/s).

En el tránsito de la sección 1-1´ a la sección 2-2´ el flujo pasa de régimen rápido a régimen lento tras experimentar el resalto hidráulico. La relación entre los calados conjugados (y1 y y2) es la siguiente:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 8F_1^2}}{2}$$

(A partir de esta expresión calculamos y2)

Donde:

- F1: número de Froude en la sección 1-1´.

Con los valores de los calados podemos calcular la velocidad en las distintas secciones de acuerdo con:

$$u_i = \frac{Q^2}{b^2 y_i}$$

Donde:

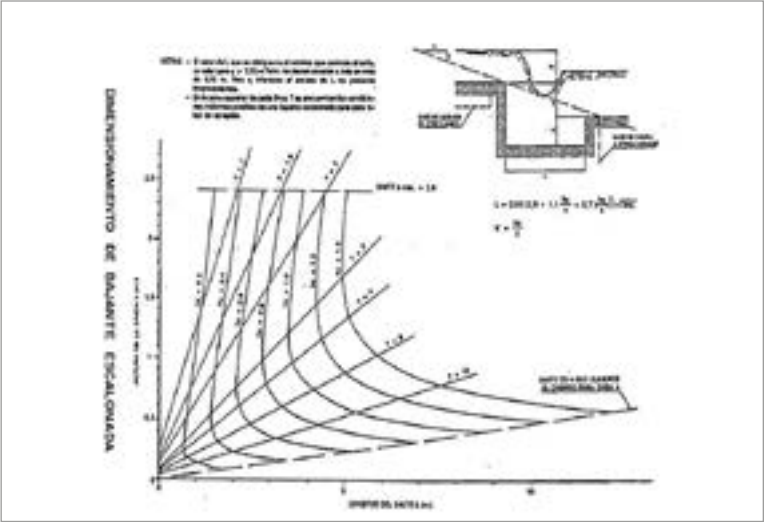
- i: número de sección.

Para el diseño de los saltos de agua; así como, de las longitudes necesarias para el desarrollo de los resaltos hidráulicos que se producen desde el punto de recogida de aguas al punto de salida, se utilizan periodos de retorno de 25 años. Para el cálculo de la magnitud de los caudales de diseño se podrá utilizar el método racional, utilizado en hidrología para determinar el Caudal Instantáneo Máximo de descarga de una cuenca hidrográfica; así como, la Norma de drenaje 5.2-IC (Orden FOM/298/2016 de 15 de febrero). La explicación del uso y aplicación de dicha norma excede el alcance del presente documento.

Proceso de cálculo

La bajante se dimensiona en función del caudal a desaguar. Para ello se puede utilizar el ábaco que se muestra a continuación:

Imagen 187. Ábaco de cálculo de la bajante escalonada. Fuente: U.S.B.R. (United States Bureau of Reclamation)



En el anterior ábaco se muestran unas líneas oblicuas relativas a diversos taludes que limitan las posibilidades de aplicación de este sistema. Es decir, para cada talud solo es posible aplicar las condiciones de h y h_c que se encuentran por encima de la línea correspondiente.

La longitud mínima del salto resultante (L) del gráfico se corresponde con la siguiente fórmula:

$$L = 0,85 \cdot \left[2,5 + 1,1 \cdot \frac{h_c}{h} + 0,7 \left(\frac{h_c}{h} \right)^3 \right] \cdot \sqrt{h \cdot h_c}$$

Donde los valores de los distintos parámetros se indican a continuación:

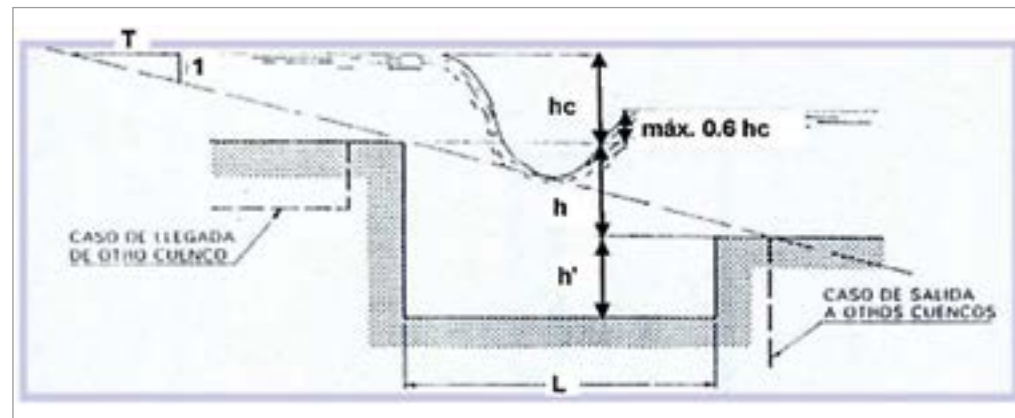


Imagen 188. Notación seguida en las fórmulas de la bajante escalonada. Fuente: U.S.B.R. (United States Bureau of Reclamation)

Los caudales totales dependen del ancho B de la bajante, siendo:

$$q = Q/B$$

Donde:

q : caudal específico (o caudal unitario) (m^2/s).

Q: caudal de máximo o capacidad total (m^3/s).

B: ancho de la bajante (m).

El calado crítico (h_c), tal y como se ha explicado anteriormente, se deduce de la fórmula:

$$h_c = \left(\frac{Q^2/B^2}{g} \right)^{1/3} = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{1/3}$$

Donde:

q: caudal específico o unitario (m^2/s).

B: ancho de la bajante escalonada (m).

Los criterios de diseño (el proceso de cálculo) son los siguientes:

- Fijar el ancho (B) para que el caudal unitario o caudal específico (q) sea inferior o igual al caudal de diseño escogido. Este valor hace admisible variar la longitud L de forma que la bajante sea válida para un

rango de caudales y taludes. La bajante será válida para caudales unitarios menores al de diseño y para longitudes de salto mayores que la longitud mínima L . Se considera que el talud y el caudal de diseño son datos de entrada conocidos.

- Una vez seleccionado el ancho (B), todos los parámetros de la fórmula quedan fijados. Asimismo, hay que comprobar que la condición $h_c < h + 0,6h$ se cumple y que la altura máxima del escalón (h) es inferior a 2,4 m.

Para conseguir cumplir las anteriores condiciones se puede variar el ancho de la bajante. Este cambio variará el valor del caudal unitario (q). De esta manera, a pesar de la existencia de la altura límite de escalón, es posible encontrar un diseño viable de una bajante escalonada incluso en el caso de taludes muy pronunciados.

Los valores que fijan los elementos a diseñar resultan de aplicar las siguientes fórmulas:

$$h' = h_c/2$$
$$T = (L + e)/h$$

Donde:

hc: calado crítico del escalón (m).

L: longitud del escalón (m).

e: espesor del muro del escalón (m).

Al fijar el talud T se obtiene de la formulación anterior el espesor mínimo (e) de labio de rebose.

Como resguardo mínimo R de los muros laterales (paralelo a la línea de talud) se toma el máximo entre los siguientes valores: 0,3 m y $1,4 \cdot h_c$ (m).

Por tanto, a partir de la anterior metodología, se diseña la bajante a partir del talud con mayor inclinación (talud crítico) existente en la ladera, de forma que se define una longitud mínima de escalón (L).

Al ampliar esta, permite adaptarse a la geometría de la ladera, manteniéndose el resto de los parámetros de la bajante fijos. La longitud mínima de escalón define el tramo crítico de la bajante escalonada.

Suele ser común la construcción de una arqueta de entrada a modo de balsa de retención en el punto valle donde se concentre la escorrentía.

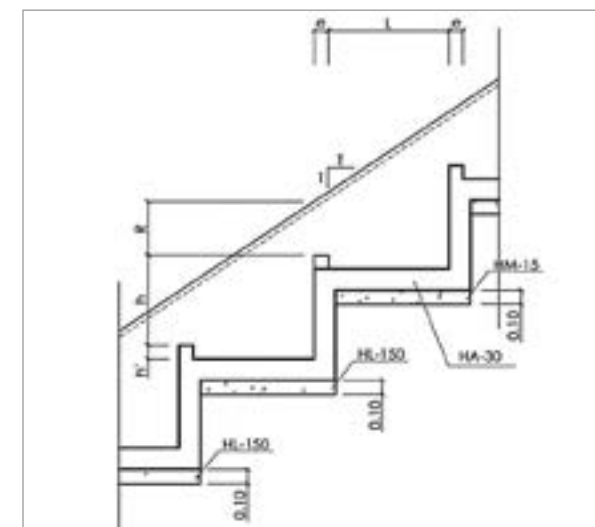


Imagen 189. Muestra de las variables involucradas en el diseño (Caso de $T = 1$; $1H:1V$)

7.3 TÉCNICAS MIXTAS

7.3.9 Cunetas

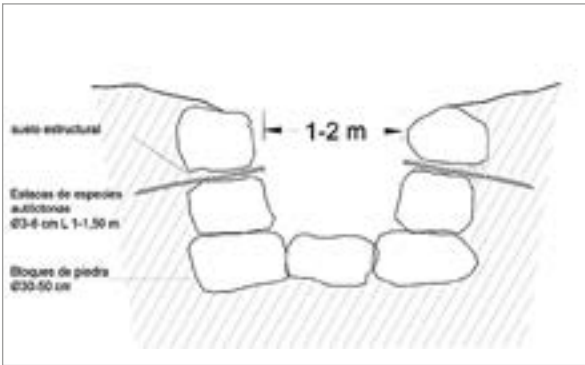


Imagen 190. Cuneta de piedra vegetada: esquema constructivo; y Merano 2000. Fuente: F. Florineth con dibujo de S. Sangalli - SCIA S.L.

7.3.9.1 Definición y alcance

Tal y como se recoge en la norma 5.2 - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, una cuneta es un elemento lineal, superficial, en forma de zanja continua en el terreno, cuya función es conducir el agua a modo de canal en lámina libre. Generalmente, es longitudinal al trazado y se sitúa al borde de la plataforma o de la explanación.

En este documento se presentan las cunetas vegetadas o naturalizadas con distintos grados de naturalización. En este tipo de soluciones, las plantas contribuyen tanto a estabilizar la estructura de madera como a mejorar el drenaje del suelo mediante la absorción del agua y la evaporación de esta. Este proceso permite la disminución de la humedad del terreno y, por tanto, del peso de este.

Tipología de cunetas:

- Cunetas de piedra y estacas.
- Cunetas en piedra y madera.
- Cunetas en hondonadas impermeabilizadas y vegetadas.

a) Cunetas de piedra y estacas

Técnica de bioingeniería mixta en la que la cuneta trapezoidal se construye con piedra de tamaño de 30-50 cm de diámetro y estacas y/o plantas enraizadas de especies autóctonas leñosas con capacidad de reproducción vegetativa. Debido a la irregularidad de las rocas, estas cunetas pueden tener mayor valor ecológico por permitir cierta revegetación y el transporte ocasional o permanente del agua y de los sedimentos.

Esta cuneta se construye en zonas de baja pendiente (hasta 3 % de pendiente longitudinal).

b) Cunetas en piedra y madera

Técnica de bioingeniería mixta en la que la estructura principal es de madera. Este tipo de cuneta se puede construir también en zonas con elevadas pendientes, convirtiéndose entonces en una bajante escalonada.

Hay dos tipologías de cunetas en piedra y madera en función de los laterales:

- Laterales en piedra
- Laterales en madera

Esta última tipología, cuando se construye a modo de saltos de agua, constituye una bajante escalonada.

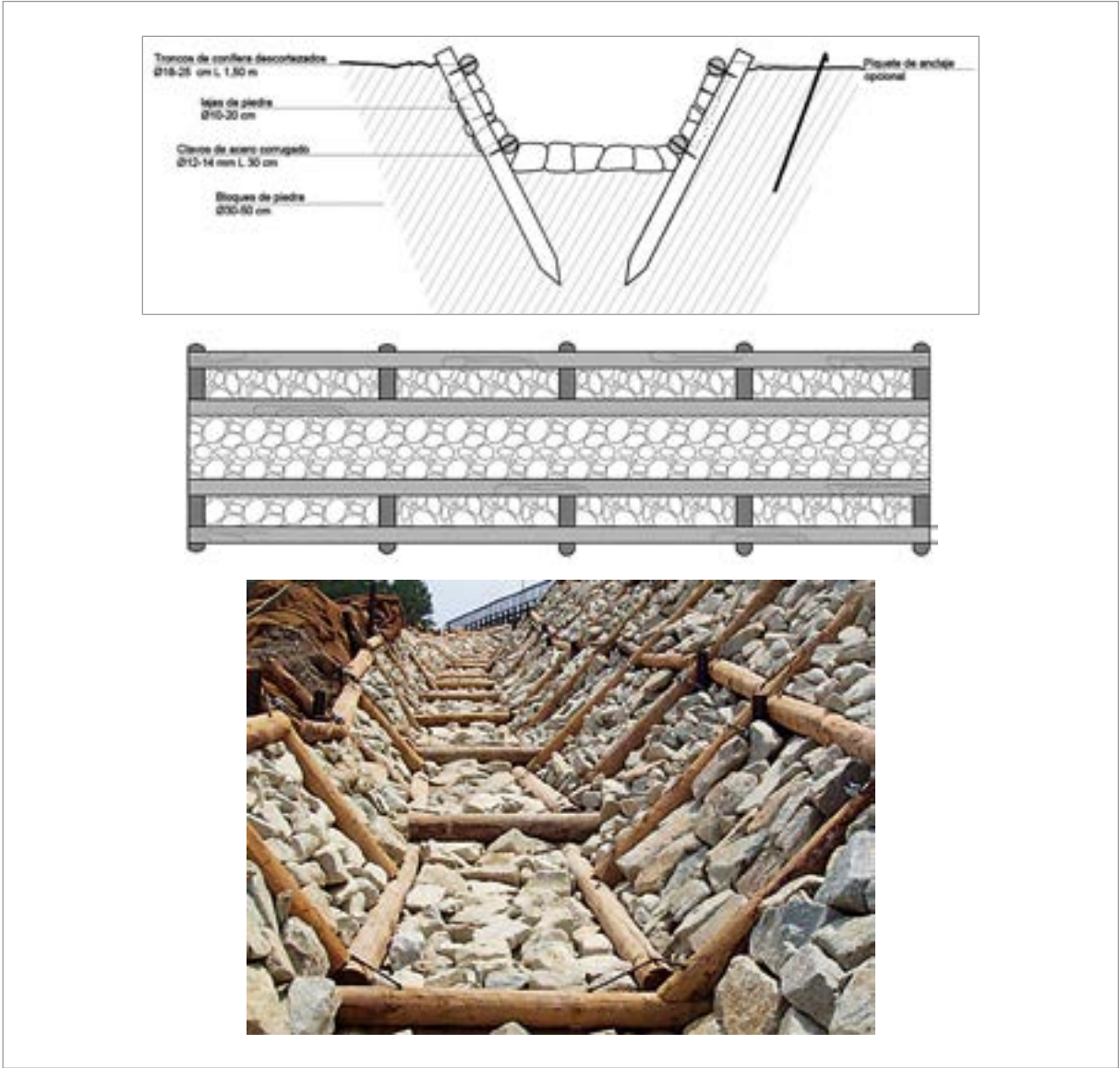


Imagen 191. Cuneta de piedra y madera: esquema constructivo. Tipología con lateral en piedra: perfil y planta Fuente: Regione Piemonte con dibujo de S. Sangalli - SCIA S.L.

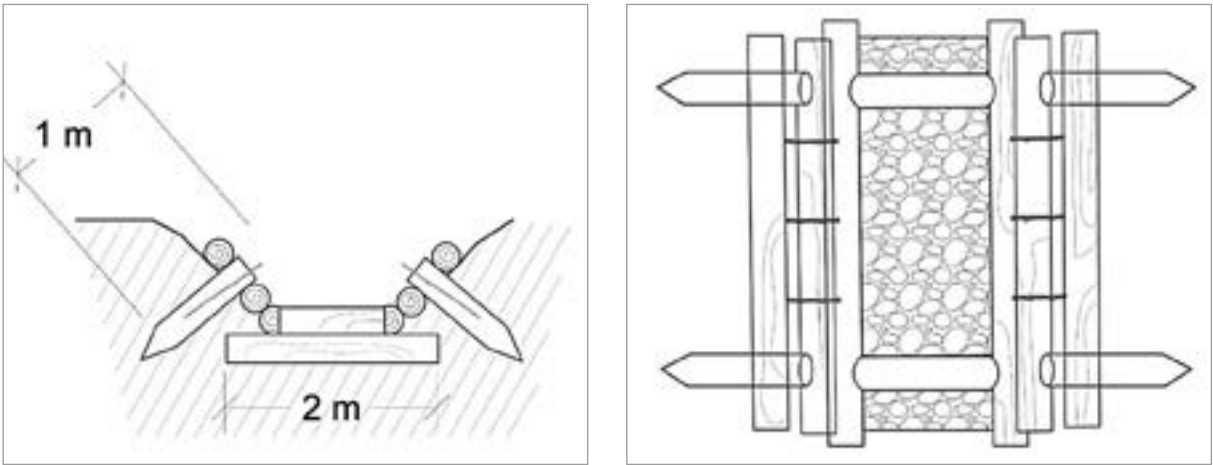


Imagen 192. Cuneta de piedra y madera: esquema constructivo. Tipología con lateral en madera: perfil y planta Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



Imagen 193. Cuneta en piedra y madera: Zarautz. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.; Merano 2000. Fuente: F. Florineth

c) Cunetas en hondonadas impermeabilizadas y vegetadas

Se trata de canaletas con sección Canaleta en tierra con revestimiento sintético susceptible de ser impermeabilizada y revegetada durante la obra. La forma de hondonada suaviza el encuentro entre taludes. En ocasiones se emplea brea como elemento impermeabilizante y fijador.

Como principales ventajas de esta técnica destacan las siguientes:

- En este tipo de soluciones, las plantas contribuyen tanto a estabilizar la estructura de madera como a mejorar el drenaje del suelo mediante la absorción del agua y la evaporación de esta (procesos y efectos de la evapotranspiración). Este proceso permite la disminución de la presión hidrostática en el terreno (presión de poro) y la reducción de la humedad del suelo, reduciendo, a su vez, el peso de este. Todos los anteriores efectos aumentan la estabilidad del terreno.
- La evolución de las cunetas es la de convertirse en estructuras estables. Esto facilita que el drenaje de la obra sea más natural.
- La integración paisajística de la obra es mejor que con otro tipo de cunetas.



Imagen 194. Fases del proceso constructivo con la malla rellena de árido y embreada in situ

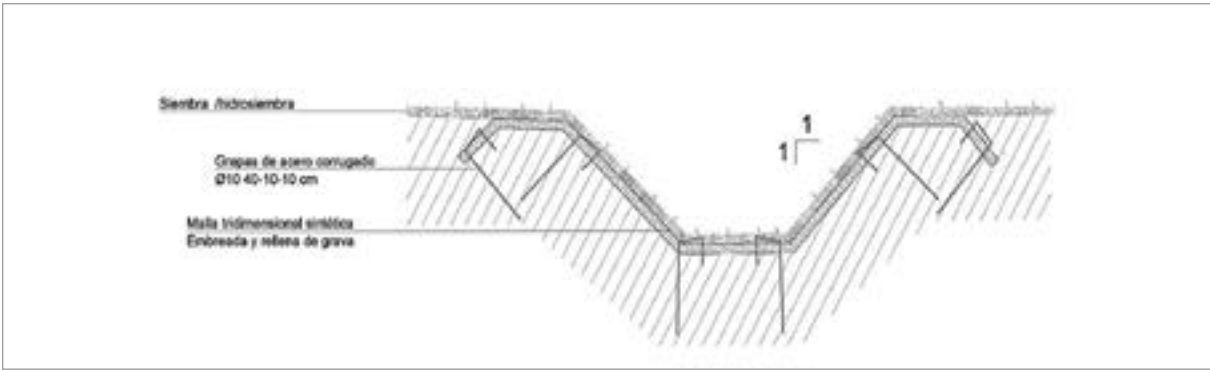


Imagen 195. Cuneta en hondonada vegetada: esquema constructivo; y ejecución
Fuente: P. Cornolini y G. Sauli con dibujo de S. Sangalli - SCIA S.L.

7.3.9.2 Aplicaciones

Esta técnica se emplea con efectividad en los siguientes casos:

- Preferiblemente en zonas cuya precipitación media anual obtenida en la serie histórica de los últimos treinta (30) años sea superior a seiscientos milímetros (600 mm) y cuando la pendiente longitudinal sea inferior al cuatro por ciento ($i < 4\%$).
- Para pendientes mayores del siete por ciento ($i > 7\%$) es preciso adoptar precauciones especiales contra la erosión como, por ejemplo: disponer escalones para disipar la energía del agua, o aumentar la rugosidad con paramentos irregulares.

Tabla 15. Resumen de las diferentes características de los tipos de cuneta

Tipo de cuneta	Tipología	Pendiente	Integración	Precio
Cuneta en piedra vegetada		Baja	Media	*
Cuneta en piedra y madera	Laterales piedra	Media	Media	**
	Laterales entramado	Alta	Alta	***
Hondonada vegetada		Baja	Alta	*

* Comparable con las tecnologías en hormigón.

Pendiente baja: hasta 3 %.

Pendiente media Hasta 5 %.

Pendiente alta hasta 15 %. A partir del 7 % se incorporarán saltos y, en caso necesario, cuencos de disipación.

7.3.9.3 Materiales

En los siguientes apartados se describen los materiales a utilizar para construir los distintos tipos de cunetas.

7.3.9.4 Material inerte específico

a) Cunetas de piedra y estacas

Bloques de piedra

Se emplean bloques de piedra de diámetro comprendido entre 0,3 y 0,5 m, o lo que en la Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera (Ministerio de Fomento, 2006) se considera escollera gruesa HMB300/1000. Se recomienda que la densidad seca de los bloques sea igual o superior a dos mil quinientos kilogramos por metro cúbico ($\rho_d \geq 2.500 \text{ kg/m}^3$).

Los bloques de piedra deben provenir de macizos rocosos sanos, de canteras, de préstamos, o de las excavaciones de la propia obra, y se obtendrán mediante voladuras con formas más o menos prismáticas y superficies rugosas. Serán preferentemente de origen local y de canteras próximas a las obras.

b) Cunetas en piedra y madera

Troncos descortezados de madera

Troncos de madera de diámetros comprendidos entre 18 y 25 cm, tanto para troncos longitudinales como transversales u oblicuos. Se utiliza madera común en el lugar de actuación: pino, alerce, etc. No obstante, se

puede utilizar madera de falsa acacia (Robinia pseudoacacia) debido a su dureza y resistencia. Con objeto de aumentar su durabilidad, los troncos se deben descortezar.

Lajas y piedras para encachado

Para el encachado se utilizan piedras de tamaño comprendido entre 10 y 30 cm de diámetro o también lajas de piedra del mismo tamaño, pero con espesores de 2 a 5 cm. Ver recomendaciones en el apartado 7.1.2.

Piquetas en acero corrugado

Se utilizan piquetas de diámetro de 12-14 mm y 1 m de longitud para la sujeción de los troncos al terreno.

c) Cunetas en hondonadas impermeabilizadas y vegetadas

Manta tridimensional sintética flexible y vegetable

Utilizada para la protección inmediata y permanente de la erosión, y con resistencia a la tracción. Suelen ser una malla tridimensional de polipropileno, con un 95 % de la estructura abierta lo que permite una buena interacción entre el suelo y la raíz.

Grapas en acero corrugado

Grapas de 10 mm de diámetro en forma de U (20-10-20 cm).

Brea

7.3.9.5 Material inerte general

Inerte terroso

Con objeto de rellenar los huecos de la estructura y permitir la emisión de raíces adventicias, se utiliza bien inerte terroso procedente de la propia excavación de la cimentación o bien un suelo estructural consistente en mezclar dicho material con áridos. En función de las características edáficas, la proporción de ambos componentes puede variar: en suelos permeables, la proporción puede llegar hasta el 40 % de tierra de excavación y el 60 % de áridos.

Impermeabilización

En los casos que se necesite impermeabilizar la cuneta, cualquiera que sea el tipo constructivo, la impermeabilización consistirá en un paquete compuesto por geotextil, EPDM y manta de bentonita sódica colocada bajo la construcción de la cuneta.

7.3.9.6 Material vivo

Material vegetal vivo

Se emplean normalmente estacas o varas vivas de diferentes especies (ver epígrafe 3.3.1) de 1-1,5 m de longitud y de 3-10 cm de diámetro a colocar entre los intersticios de los bloques con longitud suficiente para llegar a contactar y enraizar en el suelo natural. El material para utilizar proviene de especies leñosas autóctonas pioneras, pertenecientes a la serie de vegetación potencial de la zona y con características biotécnicas. Es decir, con características biológicas y técnicas que las hacen aptas para la utilización en estructuras de bioingeniería del paisaje.

La vegetación debe utilizarse en periodo de parada vegetativa extendida: de finales de octubre a primeros de abril. La densidad adecuada es de 2-5 plantas/m², dependiendo de las condiciones y especies utilizadas: a mayor tamaño final, menor densidad. En caso de no poder realizarse en el periodo detallado, se puede utilizar planta en alveolo forestal de 2 a 3 savias en contenedor forestal de 1000 cc hasta 2000 cc, pero solo de especies con capacidad de emitir raíces adventicias, principalmente salicáceas, y preferiblemente fuera de

periodo de sequías. En este caso, la densidad mínima adecuada es de 2 plantas en alveolo V8 o equivalente por m². De cara a incrementar la biodiversidad del material vegetal empleado, se recomienda la utilización de varias especies a lo largo del cuerpo de la escollera.

En el epígrafe 3.3.1. *Materiales vegetales vivos y propiedades biotécnicas* se detallan las características biológicas y técnicas de las especies más utilizadas en Bizkaia.

7.3.9.7 Siembras a voleo o hidrosiembras

Siembras de gramíneas y herbáceas bien a voleo para superficies pequeñas, bien mediante la técnica de hidrosiembra (véase capítulo Técnicas de recubrimiento: Siembras por proyección hídrica. Técnicas de recubrimiento: Siembras por proyección hídrica). Generalmente, se siembra o hidrosiembra en las superficies de las canaletas, pudiendo hacerse al mismo tiempo que se siembra el resto de la obra.

7.3.9.8 Ejecución de las obras

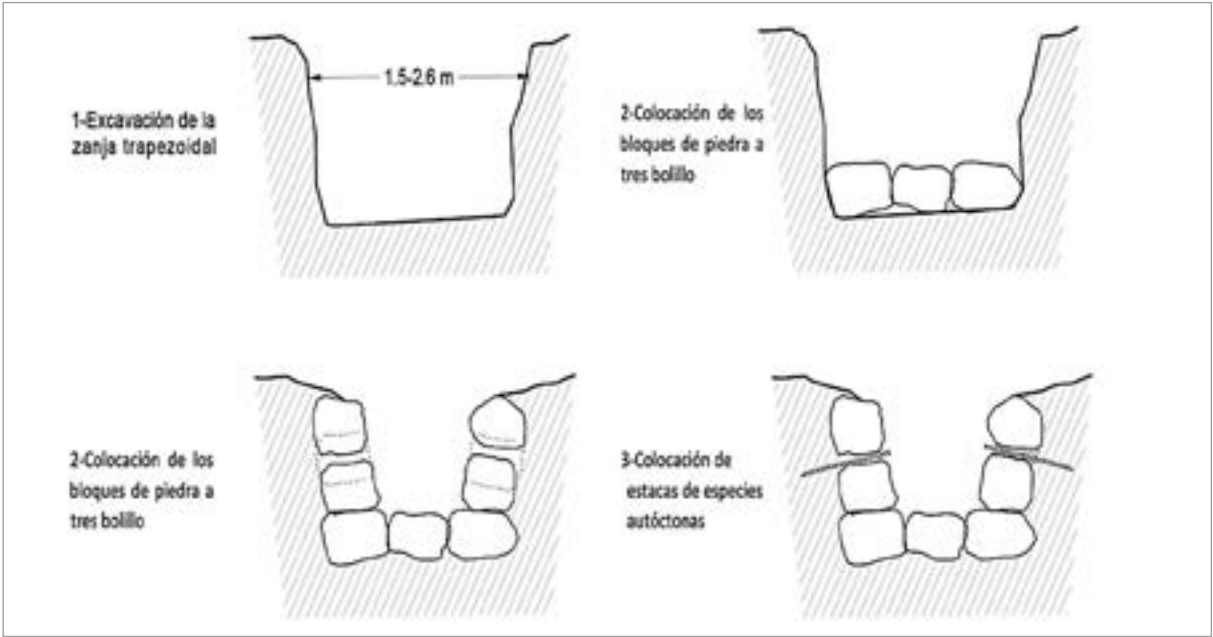
En la medida de lo posible, la ejecución, en todas las tipologías, se llevará a cabo de aguas abajo a aguas arriba y manteniendo la nivelación y pendiente de tal forma que no produzca retenciones de agua ni encharcamientos (pendiente mínima longitudinal del 1 %).

A continuación, se detalla la ejecución de los distintos tipos de cunetas.

a) Cunetas de piedra y estacas

1. Excavación de la zanja trapezoidal teniendo en cuenta el cálculo de la capacidad hidráulica de la canaleta y el diámetro de los bloques existentes a utilizar.
2. Colocación de los bloques de piedra en disposición triangular o a tres bolillos. Las paredes laterales se construyen con una pendiente comprendida entre los 90° y los 45°, en función del lugar y de la capacidad de flujo necesaria.
3. Inserción de las estacas y/o plantas entre los intersticios dejados entre las rocas de las paredes laterales de la cuneta, dejando que sobresalgan sólo una o dos yemas (unos cinco cm en el caso de los sauces) de manera que no creen turbulencias o lavado de elementos finos.

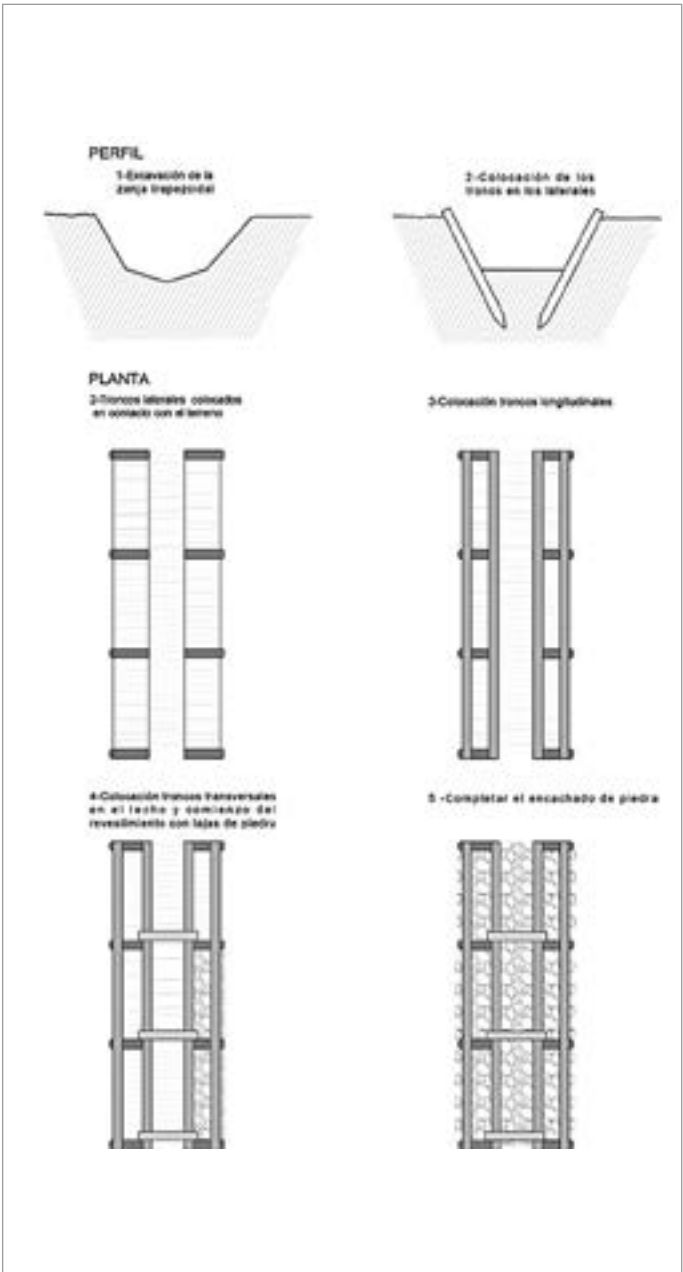
Imagen 196. Fases del proceso constructivo de la cuneta de piedra vegetada. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



b) Cunetas en piedra y madera (laterales en piedra)

1. Excavación de la zanja trapezoidal teniendo en cuenta el cálculo de la capacidad hidráulica de la canaleta y el diámetro de los bloques existentes a utilizar.
2. Colocación de los troncos en contacto con los márgenes distanciados 2 metros entre sí.
3. Colocación sobre estos troncos de troncos longitudinales.
4. Colocación en el lecho de la cuneta los troncos transversales, sobre los longitudinales, aproximadamente de dos a tres metros, dependiendo de la dimensión de la cuneta.
5. Encachado mediante piedras o lajas.
6. Relleno con material inerte y siembra posterior mediante siembra a voleo o hidrosiembra.

Imagen 197. Fases del proceso constructivo de la cuneta de piedra y madera con laterales en piedra. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



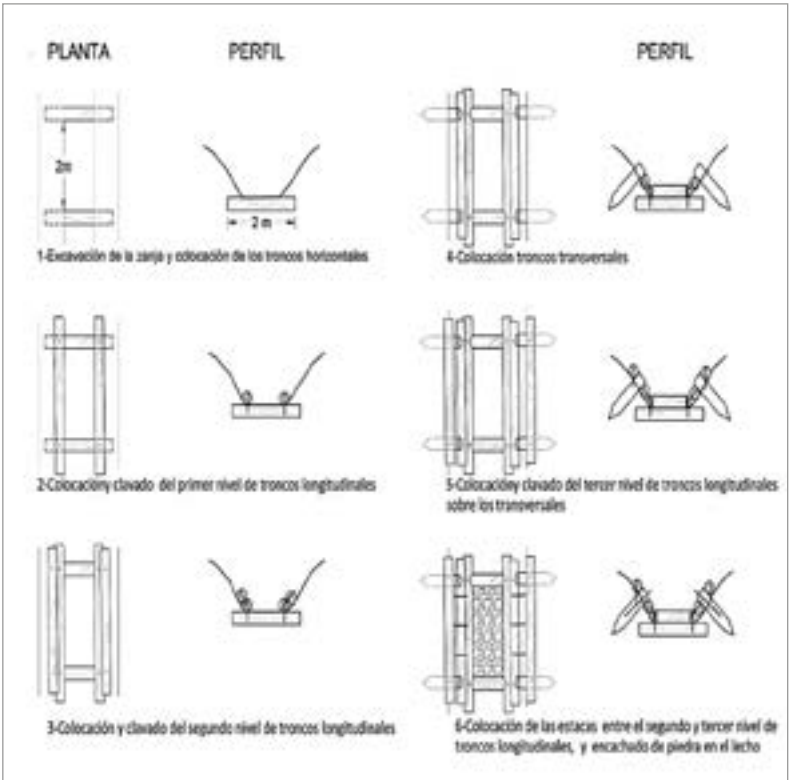
c) Cunetas en piedra y madera (laterales en madera)

Este tipo de cuneta se puede construir también en zonas con elevadas pendientes, convirtiéndose entonces en una bajante escalonada. Para su excavación se recomienda la utilización de un tipo de excavadora denominada araña.

1. Excavación mediante maquinaria de una zanja cuya anchura y profundidad coincida con la de la cuneta que se quiere construir.
2. Apertura de zanjas transversales de 20-25 cm de diámetro y 2-4 m de longitud, con una distancia entre zanjas de 2 m.
3. Colocación de troncos de madera en las excavaciones transversales (uno por zanja) y apuntalamiento de estos mediante barras de acero corrugado colocadas a favor de la pendiente. Sobre estos troncos transversales se clavan los troncos longitudinales colocados en dos o en cuatro hileras, en función del caudal. Sobre la última hilera de troncos se colocan los troncos transversales terminados en punta, colocados cada dos metros y sobre estos se clava la última fila de troncos.
4. Inserción de material vegetal. Con objeto de aumentar la estabilidad de la obra, se emplea material vegetal colocado en las cámaras. En el caso de que el agua pueda llegar hasta este nivel, se emplean fajas para rellenar esta cámara; mientras que, si el nivel hídrico es más bajo, en las cámaras laterales se colocan estacas o plantas enraizadas con o sin tierra.
5. Revegetación de los laterales mediante una hidrosiembra o siembra a voleo si su pendiente es baja.
6. El lecho de la cuneta se rellena de lajas de piedras. Se colocan troncos transversales que permiten su acumulación densa.

La estructura se desarrolla desde aguas abajo hacia aguas arriba de manera que se vaya cogiendo la pendiente.

Imagen 198. Fases del proceso constructivo de la cuneta de piedra y madera con laterales en piedra. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



Véanse las condiciones de tratamiento del material vegetal para bioingeniería en el epígrafe 3.3.1. Una vez colocadas las estacas o varas encima de los sucesivos niveles de bloques de piedra, se cubren con el árido terroso o tierra de excavación y se rellenan las grietas entre rocas, compactando manualmente para evitar los huecos de aire.

d) Cunetas en hondonadas

1. Apertura de zanja de las dimensiones calculadas en función de los parámetros hidráulicos.
2. Recubrimiento de la zanja con una malla tridimensional sintética revegetable y fijación mediante grapas.
3. Relleno de la malla con árido terroso.
4. Embreado de la malla in situ.
5. Recubrimiento con tierra vegetal.
6. Siembra a voleo o por proyección hídrica.

7.3.9.9 Control de calidad

Se llevará a cabo un control de calidad de los materiales, bloques de piedra, madera y vegetación en función de la tipología constructiva de acuerdo con lo indicado en el epígrafe 7.1. Control de calidad.

7.3.9.10 Medición y abono

Las bajantes se medirán por metros lineales realmente ejecutados y, en su medición, se considerarán incluidos el suministro y la colocación y revegetación.

7.3.9.11 Recomendaciones

- Tener en cuenta la importancia de la época para la colocación del material y elección de su tipología.
- Comprobar que se rellena y compacta adecuadamente los huecos entre los bloques o entre troncos de madera.
- Aviverar el material en obra y utilizar solo el material necesario. En el caso de emplear planta enraizada en alveolo es posible que se requiera riego de apoyo durante los primeros meses.
- En los cambios de dirección en planta y puntos de confluencia de cunetas, se deben disponer sobreelevaciones de los cajeros laterales u otras medidas para evitar desbordamientos.
- La comprobación hidráulica de las cunetas se debe efectuar, normalmente, en régimen uniforme.
- Las sobreelevaciones adoptadas en puntos de cambio de dirección y confluencias de cunetas deben justificarse por métodos empíricos o calcularse en régimen variable.
- Cobra especial importancia la definición de las especies y material vegetal vivo a emplear, en función de las condiciones ambientales y vegetación del lugar, teniendo como criterio básico que no merme las condiciones de visibilidad y seguridad de la circulación vial. En este sentido, se deberán estudiar los emplazamientos donde se ubiquen de manera que la función ecológica y la integración paisajística no interfieran en los requerimientos de seguridad vial.

Sigue ►►►

Viene de la página anterior ►►►

- Las cunetas naturalizadas se deben realizar en aquellas zonas donde se pueda garantizar un mantenimiento de forma segura. Las zonas donde esto no sea viable pueden albergar cunetas de hormigón con escapes de fauna de bioingeniería, relleno de lechos con piedra y estaquillados laterales.
- Las cunetas en las zonas de relleno o zonas inestables se deben impermeabilizar. La impermeabilización de la cuneta se lleva a cabo con lámina de EPDM o Polietileno, o bentonita.
- Se estudiará siempre la necesidad de instalación de elementos de disipación de energía en las zonas y puntos de entrega del agua de escorrentía.

Asimismo, hay que tener en cuenta que:

- La falta de resistencia de las canaletas realizadas con troncos de madera colocados unos junto a otros, especialmente si no han sido descortezados.
- La pudrición de la madera, especialmente si esta no ha sido descortezada.
- El posicionamiento erróneo de la canaleta con respecto a la ladera y al flujo de las aguas. Canaletas colocadas sobreelevadas normalmente sufren fenómenos de sifonamiento. Canaletas demasiado hundidas sufren normalmente problemas de enterramiento.
- La ausencia de estabilización de las márgenes o mala conexión de la estructura con las superficies laterales.
- Todos los tipos de cunetas, aunque se ejecuten adecuadamente, pueden sufrir daños tras sufrir un fuerte evento climatológico.

Los dos principales problemas que pueden comprometer sustancialmente la funcionalidad de estas estructuras son:

- La interrupción de la continuidad de la obra a causa de alguna rotura. Esta, normalmente, se produce por el hundimiento de los márgenes laterales debido a la saturación de la capa superficial del terreno (de la ladera), o cuando el transporte de agua es tal que moviliza también la parte baja de la canalización (especialmente en las canaletas de madera y piedra).
- Sifonamiento o tubificación que provoca que el agua no entre en la canalización, excavando la base y rellenos de la bajante. Este fenómeno puede producirse también en las canaletas de hormigón o de acero.

7.3.9.12 Propuesta de precio descompuesto: tipos de cuneta

m³ Cuneta de piedra y estacas					
Construcción de cuneta vegetada de bloques de piedra caliza, careada, colocados con retroexcavadora sobre cadenas colocación de material vegetal y relleno de los huecos existentes entre los bloques inerte terroso					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	Materiales				
	t	Bloque de piedra caliza, careada.	1,00	13,05 €	13,05 €
	m²	Estacilla o panel en obra	4,00	2,70 €	10,80 €
Subtotal materiales:					23,85 €
2	Equipo y maquinaria				
	h	Retroexcavadora sobre cadenas, de 118 kW, con pista para esoltera.	0,20	117,27	23,45 €
Subtotal equipo y maquinaria:					23,45 €
3	Mano de obra				
	h	Capataz Obra civil	0,01	24,89 €	0,25 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,05	22,07 €	1,10 €
	h	Peón ordinario construcción	0,10	18,00 €	1,80 €
Subtotal mano de obra:					3,15 €
4	Costes directos complementarios				
	%	Costes directos complementarios	0,02	25,61 €	0,53 €
Coste de mantenimiento decenal: 10,67% en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4)		56,99 €

Imagen 199. Precio descompuesto de cuneta de piedra y estacas. Referencia de precios: Base de precios de edificación y urbanización (Gobierno Vasco, 2021)

m³ Cuneta en madera y piedra Tipo A					
Construcción de cuneta vegetada en madera y piedra con laterales en piedra colocados con retroexcavadora sobre cadenas colocación de material vegetal y relleno de los huecos existentes entre los bloques inerte terroso					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	Materiales				
	m³	Trecoas de madera de conifera, descorchada diámetro 18-25 cm	0,40	81,84 €	32,74 €
	t	Piedra de relleno	1,20	8,00 €	9,60 €
	m²	Estacilla o panel en obra	4,00	2,70 €	10,80 €
	m²	Cierzo en acero corrugado	4,00	0,88 €	3,52 €
Subtotal materiales:					56,74 €
2	Equipo y maquinaria				
	h	Retroexcavadora sobre orugas de 180 kW	0,15	50,14	7,52 €
Subtotal equipo y maquinaria:					7,52 €
3	Mano de obra				
	h	Capataz Obra civil	0,05	24,89 €	1,24 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,30	22,07 €	6,62 €
	h	Peón ordinario construcción	0,60	18,00 €	10,80 €
Subtotal mano de obra:					18,67 €
4	Costes directos complementarios				
	%	Costes directos complementarios	0,02	26,19 €	0,42 €
Coste de mantenimiento decenal: 10,87% en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4)		83,45 €

Imagen 200. Precio descompuesto de cuneta de piedra y madera con laterales en piedra. Referencia de precios: Base de precios de edificación y urbanización (Gobierno Vasco, 2021)

A m³ Cuneta en madera y piedra Tipo B					
Construcción de cuneta vegetada en madera y piedra con laterales en madera colocados con retroexcavadora sobre cadenas colocación de material vegetal y relleno de los huecos existentes entre los bloques inerte terroso					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	Materiales				
	m³	Trecoas de madera de conifera, descorchada diámetro 18-25 cm	1,20	81,84 €	98,21 €
	t	Piedra de relleno	0,40	8,00 €	3,20 €
	m²	Estacilla o panel en obra	4,00	2,70 €	10,80 €
	m²	Cierzo en acero corrugado	0,00	8,90 €	0,40 €
Subtotal materiales:					112,61 €
2	Equipo y maquinaria				
	h	Retroexcavadora sobre orugas de 180 kW	0,15	50,14	7,52 €
Subtotal equipo y maquinaria:					7,52 €
3	Mano de obra				
	h	Capataz Obra civil	0,05	24,89 €	1,24 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,30	22,07 €	6,62 €
	h	Peón ordinario construcción	0,60	18,00 €	10,80 €
Subtotal mano de obra:					18,67 €
4	Costes directos complementarios				
	%	Costes directos complementarios	0,02	26,19 €	0,42 €
Coste de mantenimiento decenal: 10,37% en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4)		143,79 €

Imagen 201. Precio descompuesto de cuneta de piedra y madera con laterales en madera. Referencia de precios: Base de precios de edificación y urbanización (Gobierno Vasco, 2021)

A m³ Cuneta en hondonada vegetada					
Construcción de cuneta vegetada en madera y piedra con laterales en madera colocados con retroexcavadora sobre cadenas colocación de material vegetal y relleno de los huecos existentes entre los bloques inerte terroso					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	Materiales				
	m²	malla geotextil sintética tridimensional	2,00	8,80 €	17,60 €
	m²	Grapas en acero corrugado de 60 cm	8,00	8,80 €	70,40 €
	kg	hierro	1,00	1,00 €	1,00 €
Subtotal materiales:					89,00 €
2	Equipo y maquinaria				
	h	Retroexcavadora sobre orugas de 180 kW	0,15	50,14	7,52 €
Subtotal equipo y maquinaria:					7,52 €
3	Mano de obra				
	h	Capataz Obra civil	0,01	24,89 €	0,25 €
	h	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,05	22,07 €	1,10 €
	h	Peón ordinario construcción	0,15	18,00 €	2,70 €
Subtotal mano de obra:					4,05 €
4	Costes directos complementarios				
	%	Costes directos complementarios	0,02	11,57 €	0,23 €
Coste de mantenimiento decenal: 18,87% en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3+4)		101,80 €

Imagen 202. Precio descompuesto de cuneta en hondonada vegetada. Referencia de precios: Base de precios de edificación y urbanización (Gobierno Vasco, 2021)

7.3.9.13 Cálculo

Para el cálculo y dimensionamiento de los distintos tipos de cuneta se siguen las especificaciones de la Norma 5.2 - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras.

La comprobación hidráulica de las cunetas se debe efectuar normalmente en régimen uniforme, según se especifica en el epígrafe 3.4.5. de dicha Norma. Las sobreelevaciones adoptadas en puntos de cambio de dirección y confluencias de cunetas deben justificarse por métodos empíricos o calcularse en régimen variable.

A continuación, se indican las dos partes fundamentales para tener en cuenta en su diseño: la capacidad hidráulica y la velocidad del agua.

En los elementos lineales se debe comprobar que se cumplen simultáneamente las dos condiciones siguientes:

- La capacidad hidráulica (QCH) de los elementos lineales en régimen uniforme y en lámina libre para la sección llena (véase la imagen 203. Caudal en función del calado en elementos lineales en lámina libre en régimen uniforme sin entrada en carga debe ser mayor que el caudal de proyecto, QP.

$$Q_{CH} = \frac{J^{1/2} \cdot R_H^{2/3} \cdot S_{MAX}}{n} \geq Q_P$$

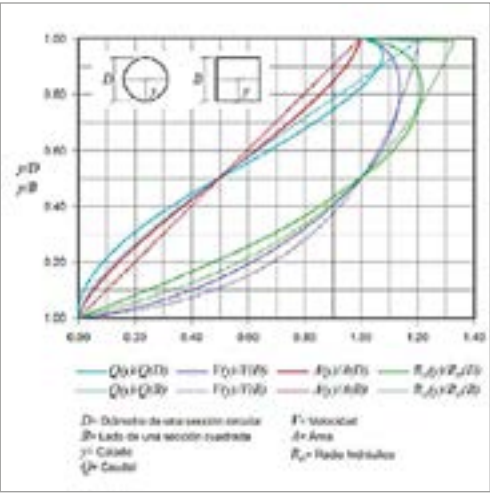


Imagen 203. Caudal en función del calado en elementos lineales en lámina libre en régimen uniforme

- La velocidad media del agua para el caudal de proyecto (m/s) debe ser menor que la que produce daños en el elemento de drenaje superficial, en función de su material constitutivo:

$$V_P = \frac{Q_P}{S_P} < V_{MAX}$$

Donde:

Q_{CH}: capacidad hidráulica del elemento de drenaje. Caudal en régimen uniforme en lámina libre para la sección calculado igualando las pérdidas de carga por rozamiento con las paredes y fondo del conducto a la pendiente longitudinal (m³/s).
J: pendiente (adimensional).
S_{Max}: área de la sección transversal del conducto o cuneta (m²).
R_H: radio hidráulico (m) = S/p.

$$R_H = \frac{S}{p}$$

Donde:

S: área de la sección transversal ocupada por la corriente (m²).
p: perímetro mojado (m).
n: coeficiente de rugosidad de Manning (s/m^{1/3}) (valores tabulados en Coeficiente de rugosidad n (s/m1/3) a utilizar en la fórmula de Manning-Strickler para conductos y cunetas en función del material empleado.).
Q_p: caudal de proyecto del elemento de drenaje (m³/s).
S_p: área de la sección transversal ocupada por la corriente para el caudal de proyecto (m²).
V_{Max}: velocidad máxima admisible en el elemento de drenaje, en función del material del que está constituido (m/s). Esta comprobación se efectuará por tramos en los que el caudal, la pendiente y la geometría y los materiales de la sección, permanezcan constantes (ver Velocidad máxima del agua VMax(m/s).

Tabla 16. Velocidad máxima del agua VMax(m/s)

Naturaleza de la superficie	Máxima velocidad admisible (m/s)
Terreno arenoso o limoso sin vegetación	0,20-0,60
Terreno arcilloso sin vegetación	0,60-0,90
Terreno en arcillas duras y margas blandas sin vegetación	0,90-1,40
Terreno en gravas y cantos sin vegetación	1,20-2,30
Terreno parcialmente cubierto de vegetación	0,60-1,20
Terreno con vegetación herbácea permanente	1,20-1,80
Terreno con vegetación arbustiva permanente	1,40-3,00
Rocas blandas	1,40-3,00
Mampostería, rocas duras	3,00-5,00
Hormigón	4,50-6,00

Nota: además de las variaciones debidas al distinto comportamiento de los materiales comprendidos en las categorías genéricas de esta tabla, los valores superiores son admisibles para situaciones esporádicas, mientras que los valores más bajos son para situaciones frecuentes. En el caso de las cunetas vegetadas, las velocidades inferiores se considerar apenas terminada la obra mientras que las superiores son posibles cuando la vegetación está ya desarrollada y es funcional.

Tabla 17. Coeficiente de rugosidad n (s/m1/3) a utilizar en la fórmula de Manning-Strickler para conductos y cunetas en función del material empleado

Material		n(sm-1/3)
Cuneta	Sin vegetación. Superficie uniforme	0,020-0,025
	Sin vegetación. Superficie irregular	0,020-0,033
	Con vegetación herbácea segada	0,033-0,040
	Con vegetación herbácea espesa	0,040-0,050
	Con vegetación arbustiva	0,035-0,050
	En roca. Superficie uniforme	0,029-0,033
	En roca. Superficie irregular	0,033-0,050
	Fondo de grava. Cajeros de hormigón	0,017-0,020
	Fondo de grava. Cajeros enchachados	0,022-0,033
	Encachado	0,020-0,029
	Hormigón proyectado	0,017-0,022
	Revestida con hormigón in situ	0,013-0,017
Pavimento con mezclas bituminosas		0,013-0,018
Hormigón en marcos y otras estructuras in situ		0,014-0,017
Gaviones		0,020-0,040
Tubo de hormigón		0,012-0,017
Tubo de fundición		0,010-0,015
Tubo de acero		0,010-0,014
Tubo de materiales poliméricos		0,008-0,013

Nota: los valores inferiores de cada uno de los rangos resultan de aplicación a conductos recién instalados, rectos, sin arquetas ni piezas especiales intermedias, limpios y en buen estado de conservación. El envejecimiento de los conductos se suele traducir en un incremento del valor del número de Manning que no suele superar el límite superior de esta tabla.

7.3 TÉCNICAS MIXTAS

7.3.10 Escollera vegetada o vegetalizada



Imagen 204. Detalle de la finalización de la ejecución de las obras e inicio del desarrollo de escollera vegetalizada
Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.

7.3.10.1 Definición y alcance

La escollera vegetada o vegetalizada es una técnica mixta de estabilización de taludes en las obras de bioingeniería del paisaje, basada en la colocación de bloques de piedra irregulares, de forma poliédrica, sin labrar, de gran tamaño (masa comprendida entre 300 y 1000 kg) y con funciones de contención o sostenimiento.

Entre los bloques se insertan estacas o varas de especies autóctonas con capacidades biotécnicas, siguiendo los principios y recomendaciones formulados en este texto. Se trata de un muro que actúa por gravedad.

Se diferencia de las escolleras tradicionales en la colocación dentro de la estructura de elementos vegetales que contribuyen en su desarrollo a un incremento de la cohesión, un aumento del ángulo de rozamiento interno y de la permeabilidad, favoreciendo la estabilidad y una mejor integración paisajística y ecológica en el entorno. La vegetación por tanto juega un papel activo dentro de la estructura.

La construcción tiene algunas limitaciones, respecto a las escolleras tradicionales, tanto en dimensiones máximas como en inclinaciones.

Entre las principales ventajas que puede ofrecer la escollera vegetada colocada para la construcción de muros se encuentran:

1. Facilidad de drenaje a través de los intersticios existentes entre los bloques pétreos y el suelo estructural permeable.
2. Facilidad para adaptarse a movimientos diferenciales del terreno, admitiendo ciertas distorsiones sin sufrir daños estructurales.
3. Facilidad de integración de la escollera en el entorno, al revegetarse completamente con estaquillas o especies colonizadoras.
4. Técnica estable desde el primer momento con efecto protector inmediato.
5. Aumento del efecto de anclaje al terreno una vez la vegetación ha enraizado.
6. Menor necesidad de excavación respecto a las escolleras tradicionales.

7.3.10.2 Aplicaciones

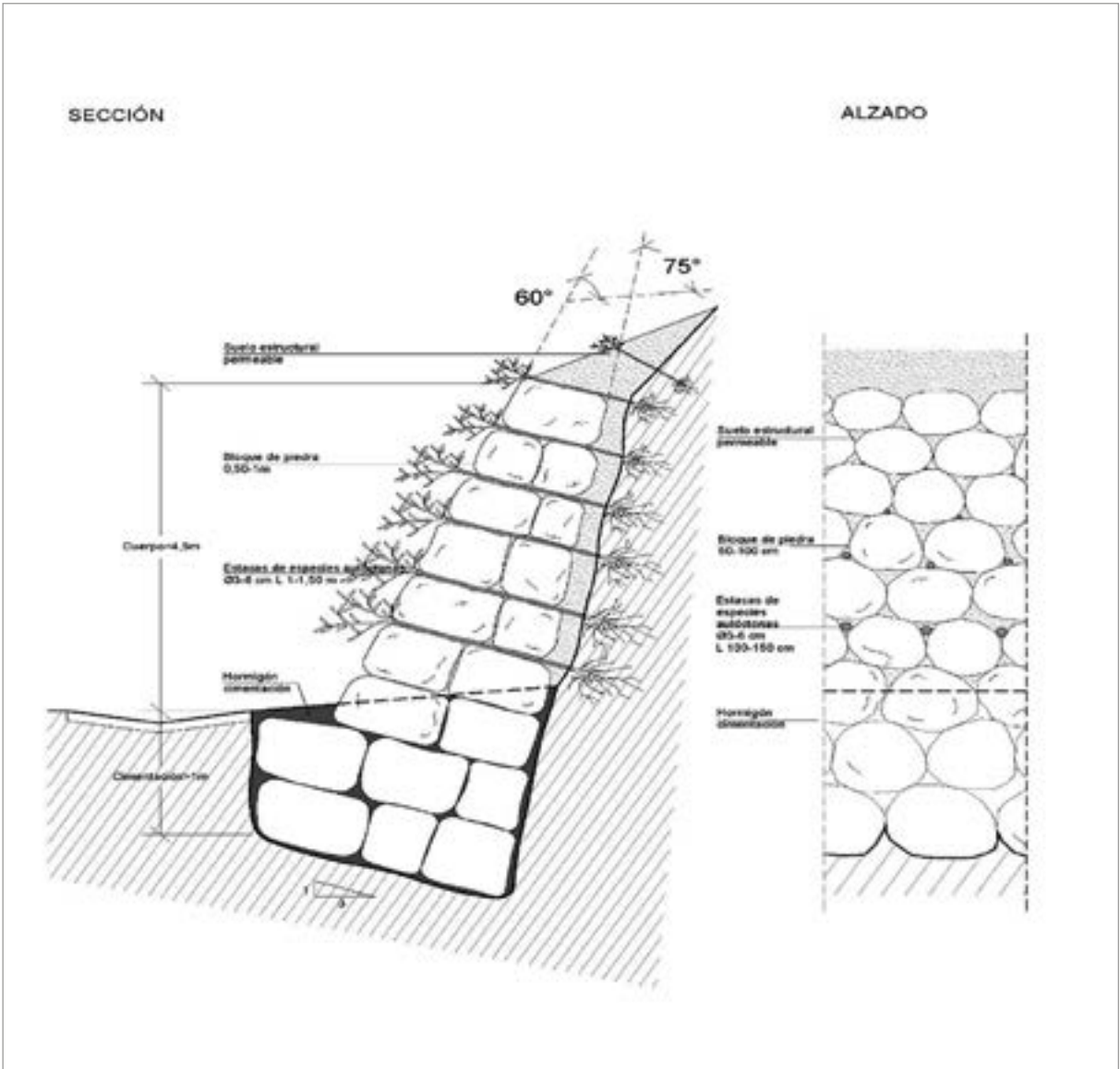
Las escolleras vegetalizadas se emplean principalmente en la contención de laderas y, convenientemente dimensionadas, también como sostenimiento de pequeños rellenos o terraplenes.

Cobra especial importancia la definición de las plantas biotécnicas a emplear, en función de las condiciones ambientales y vegetación del lugar, teniendo como criterio básico que no merme las condiciones de visibilidad y seguridad de la circulación vial.

En este sentido, se debieran estudiar los emplazamientos donde se ubiquen, de manera que la función ecológica y la integración paisajística no interfieran en los requerimientos de seguridad vial.

En cuanto al aspecto que afecta al elemento inerte, se recomienda adoptar las instrucciones dadas por la *Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera* (Ministerio de Fomento, 2006). En este texto se hará referencia más específica a la parte vegetal de la obra.

Imagen 205. Escollera vegetada o vegetalizada: esquema constructivo. Fuente: S. Sangalli - SCIA S.L.



7.3.10.3 Materiales

7.3.10.4 Bloques de piedra o de escollera

Es el elemento principal que interviene en la ejecución de la tipología de muro contemplada en este epígrafe, unidad básica a partir de la cual, por agregación, se construye el muro. Se emplean bloques de piedra de diámetro comprendido entre 0,5 y 1 m, o lo que en la Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera (Ministerio de Fomento, 2006) se considera escollera gruesa HMB300/1000. Se recomienda que la densidad seca de los bloques sea igual o superior a dos mil quinientos kilogramos por metro cúbico ($\rho_d \geq 2500 \text{ kg/m}^3$).

Los bloques de escollera deben provenir de macizos rocosos sanos, de canteras, de préstamos, o de las excavaciones de la propia obra, y se obtendrán mediante voladuras con formas más o menos prismáticas y superficies rugosas. Serán preferentemente de origen local y de canteras próximas a las obras.

Las propiedades de los bloques tienen una especial incidencia en el comportamiento de la obra. Para muchas de estas propiedades se toma como referencia la norma UNE EN 13383 Escolleras.

7.3.10.5 Material vegetal vivo

Se emplean normalmente estacas o varas vivas de diferentes especies autóctonas con capacidad biotécnicas (ver epígrafe 3.3.1) a colocar entre los intersticios de los bloques con longitud suficiente para llegar a contactar y enraizar en el suelo natural del trasdós de la escollera:

- Estacas vivas o fragmentos vegetales vivos no ramificados procedentes de vegetación autóctona pionera de 1 m a 1,5 m de longitud y de 3 a 10 cm de diámetro. A utilizar en las partes altas de la escollera.
- Varas vivas de vegetación autóctona con una longitud, por lo general, de entre 2 y 3 m y un diámetro mínimo de 4 cm. A utilizar en la parte basal y media del cuerpo de escollera.

El material vegetal a utilizar proviene de especies leñosas autóctonas pioneras, pertenecientes a la serie de vegetación potencial de la zona y con características biotécnicas.

La vegetación debe utilizarse en periodo de parada vegetativa extendida: de finales de octubre a primeros de abril. La densidad adecuada es de 2-5 plantas/m², dependiendo de las condiciones y especies utilizadas: a mayor tamaño final, menor densidad.

En caso de no poder realizarse en el periodo detallado, se puede utilizar planta en alveolo forestal de 2 a 3 savias en contenedor forestal de 1000 cc hasta 2000 cc, pero sólo de especies con capacidad de emitir raíces adventicias, principalmente salicáceas, y preferiblemente no en periodo de sequía. En este caso, la densidad mínima adecuada sería de 2 plantas en alveolo V8 o equivalente por m². De cara a incrementar la biodiversidad del material vegetal empleado, se recomienda la utilización de varias especies a lo largo de todo el terraplén de piedra.

En el epígrafe 4.3.1. *Materiales vegetales vivos y propiedades biotécnicas* se detallan las características biológicas y técnicas de las especies más utilizadas en Bizkaia.

7.3.10.6 Inerte terroso / Suelo estructural

Con objeto de rellenar los huecos de la estructura y permitir la emisión de raíces adventicias, se utilizará bien inerte terroso procedente de la propia excavación de la cimentación o bien un suelo estructural consistente en mezclar dicho material con áridos.

- El suelo estructural está formado principalmente por un 80 % de áridos calcáreos, ofíticos o silíceos, mezclados con un 20 % de tierra de excavación (no necesariamente tierra vegetal) con una composición que puede asimilarse a la siguiente: 45 % de arena, 40 % limos, 10 % arcilla y 5 % de materia orgánica. Este suelo

estructural persigue mantener una alta permeabilidad, una baja deformación a compresión y permitir el enraizamiento de especies vegetales.

- Como alternativa, se puede emplear también inerte terroso procedente de la propia excavación mezclado con los áridos. En función de las características edáficas, la proporción de ambos componentes puede variar: en suelos permeables la proporción puede llegar hasta el 40 % de tierra de excavación y el 60 % de áridos.

7.3.10.7 Hormigón en cimientos

Las cimentaciones de escolleras son en general macizos de hormigón ciclópeo de superficie variable, de acuerdo con el proyecto, altura y características de la estructura de la escollera. El hormigón a emplear será del tipo HM-20/B/40/A.

En general, el cimiento de la escollera se debe hormigonar, pudiendo en ocasiones utilizarse recebo pétreo con material de las mismas características que la escollera. El hormigonado del cimiento del muro de escollera es necesario para poder considerar que trabaja como un elemento rígido.

Además, en el proyecto se definirán la cota a alcanzar con el hormigón y las pendientes a dar a su superficie para evitar acumulaciones de agua, enrasando normalmente con los bordes de la excavación o los elementos de drenaje en su caso.

Si la base excavada para la instalación de la escollera es roca sana sin presencia de afluencias de agua, la Dirección de Obra podría desestimar el hormigonado de los bloques pétreos de la cimentación.

7.3.10.8 Ejecución de las obras

La ejecución comprende las siguientes fases:

1. Excavación de la cimentación: Se procede a la excavación de la cimentación en la base del talud hasta la cota definida en el proyecto, comprobando que las características del terreno se corresponden con las previstas. La profundidad mínima recomendable es de un metro (1 m).

El fondo de excavación de la cimentación debe presentar una contra inclinación respecto a la horizontal de valor aproximado 3H:1V para añadir estabilidad a los siguientes niveles o hiladas de la escollera.

La excavación del terreno a sustituir se ejecutará y abonará de manera independiente, según los m³ realmente excavados (saneados), previa aprobación por parte de la DO y medido sobre perfil, incluyéndose la disminución del rendimiento por la necesidad de ejecutar bataches, introducción de la parte viva, etc.

2. Cimentación: La cimentación no difiere de aquella propia de escolleras convencionales. Una vez efectuada la excavación del cimiento, se debe proceder a la colocación, uno a uno, de los bloques de piedra mediante maquinaria específica en disposición irregular en el fondo de la cimentación y a lo largo de la pendiente hasta alcanzar aproximadamente la cota del terreno natural en el intradós.

Se debe proceder de forma secuencial la excavación, vertido y colocación por bataches no consecutivos de no más de diez metros (10 m) de frente o aquella dimensión que las condiciones geotécnicas permitan (Ministerio de Fomento, 2006).

Posteriormente, se procederá al hormigonado de forma que se rellenen los huecos existentes entre los bloques de escollera. De este modo, se consigue una mayor rigidez y homogeneidad en la cimentación.

Por lo general, se empleará hormigón HM-20/B/40/A para la cimentación de la escollera. Este hormigón envolverá los bloques de escollera y su vertido se realizará en dos fases: la primera comprende el relleno de la práctica totalidad del cimiento, y la segunda se ejecuta una vez colocada la primera hilada del cuerpo del muro y deberá enrasar con la cota del terreno natural en el intradós. Dependiendo de la porosidad obtenida en la escollera del cimiento y de las características del terreno, el volumen de hormigón a verter suele estar comprendi-

do entre doscientos setenta y cinco y trescientos cincuenta litros por metro cúbico de cimient (275-350 l/m³). Las piedras deben estar dispuestas a contrapendiente 3H:1 lo que mejora la estabilidad global de la estructura.

3. Cuerpo del muro de escollera: Los bloques de piedra que conforman el cuerpo de la escollera se colocan de manera que resulten estables con una contra inclinación de las hiladas de bloques en torno al 3H:1V respecto a la horizontal. Los bloques se colocarán formando un entramado tridimensional que dote al conjunto de la máxima trabazón posible. Resulta recomendable alternar orientaciones de bloques de forma que en algunos la dimensión mayor sea paralela al paramento y en otros la mayor longitud esté orientada en dirección trasdós-intradós.

Cada piedra de escollera deberá de apoyar su cara inferior en al menos dos bloques de la hilada inferior y estar en contacto con los bloques laterales adyacentes, además de con otros dos de la hilada superior.

En taludes de desmonte, las escolleras de contención se colocarán de manera que el talud formado por las tierras quede enrasado con la cara exterior de las escolleras, según se indique en los planos o por indicación expresa de la Dirección de Obra.

La pendiente máxima en el caso de una escollera vegetalizada es de un frente de 60-65°. Mayor inclinación dificulta que la planta pueda prosperar al no llegarle adecuadamente el agua. Otro límite se encuentra en el espesor, dado que las escolleras vegetalizadas no pueden tener mayor espesor que el del material vegetal a utilizar, normalmente 3 metros. Ello conlleva una limitación en altura de la escollera de hasta 5 metros a coronación.

Para la colocación de la escollera se utilizará una pala excavadora, o medio análogo, dotada de pinza para coger los bloques, y una vez posicionados estos se afirmarán con golpes de cazo perpendiculares y paralelos al talud. Además, se ejecutará mediante bataches no consecutivos y de una longitud de frente menor a cinco metros (5 m).

4. Colocación del material vivo: Simultáneamente a la fase de colocación de los bloques de roca se procede a la colocación del material vegetal entre los huecos de los bloques, llegando hasta el trasdós de la estructura.

Las estacas o varas vivas deben tener una longitud suficiente para llegar a contactar con el terreno natural del trasdós de la escollera y en su colocación se prestará especial atención a que las yemas terminales estén orientadas hacia el exterior del talud, sobresaliendo unos diez-veinte centímetros (10-20 cm) desde la superficie frontal de la escollera vegetalizada.

La colocación de las estacas o de las varas vivas se hace de manera irregular dependiendo del tamaño de los bloques empleados, pero manteniendo una densidad mínima de dos estacas por metro cuadrado (2 estacas/m²), llegando en las zonas donde las tensiones sean más intensas hasta las cinco estacas por metro cuadrado (5 estacas/m²). Las estacas/varas no se deben insertar a posteriori, ya que sería difícil que pudieran enraizar en el trasdós. En la parte basal se colocan normalmente varas, debido a su mayor tamaño, mientras que en las partes altas de la escollera se emplean estacas. El material vegetal se coloca entre los huecos intersticiales, evitando que el peso del bloque de la hilada superior grave sobre él, evitando, así, reducir la trabazón entre bloques.

Se traerá a obra el material vegetal a utilizar en uno o dos días como máximo, manteniéndolo en obra avivado en arena húmeda.

La ejecución debe realizarse preferentemente en periodo de parada vegetativa. En caso de no realizase en este periodo se procederá a la utilización de planta en alveolo forestal de dos o tres savias, y se prestará especial atención a que el alveolo entre en contacto con el trasdós de la escollera y que la planta tenga la longitud suficiente para emerger por los intersticios entre bloques de la escollera.

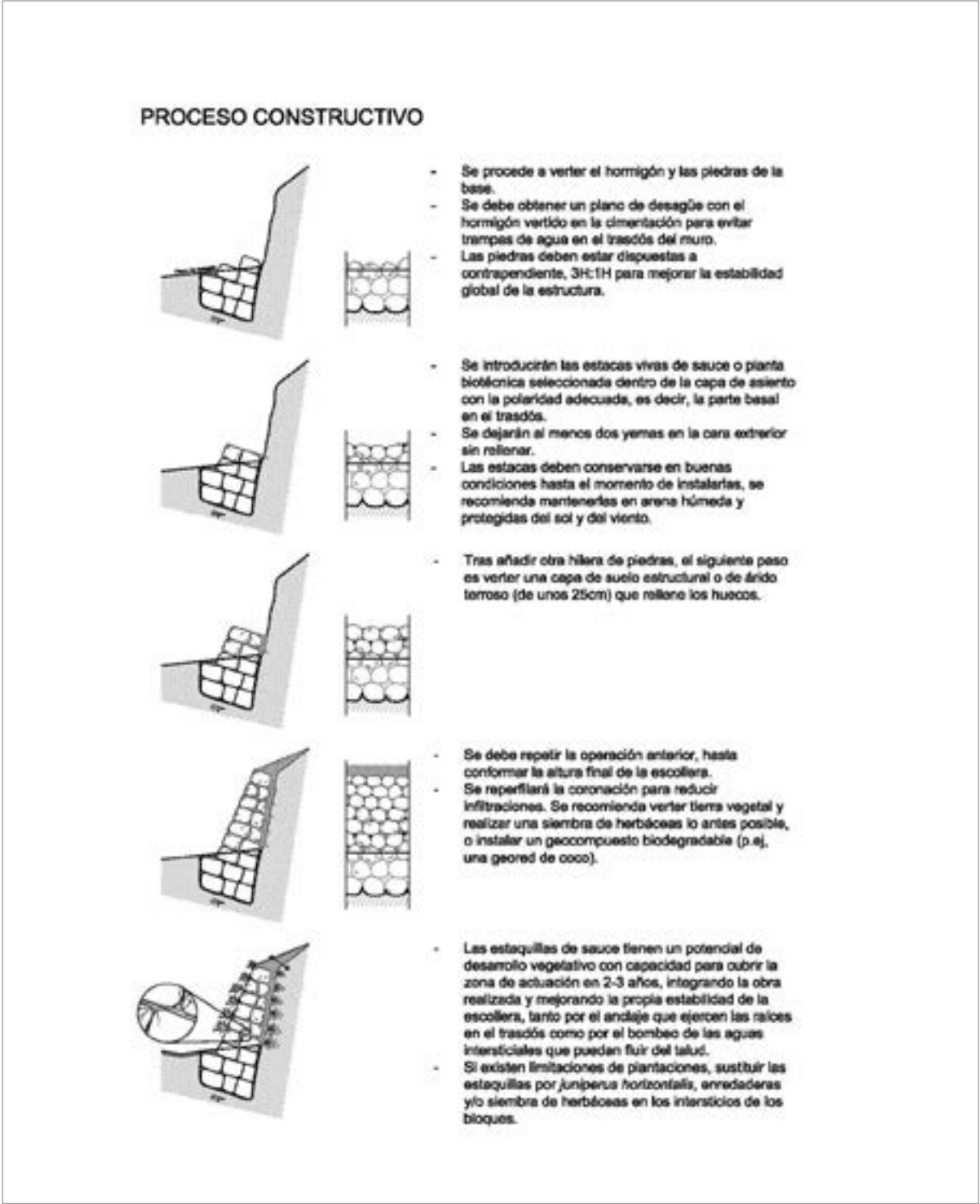
5. Relleno con el árido terroso o suelo estructural: Una vez colocadas las estacas o varas encima de los sucesivos niveles de bloques de piedra, se cubren con el árido terroso o suelo estructural y se rellenan las grietas entre rocas, compactando manualmente para evitar los huecos de aire. Este material, además de muy per-

meable con lo que se facilita la evacuación del agua del trasdós, no se deforma y evita que la estructura se vea alterada debido al peso de los bloques.

6. Remodelación de la morfología colindante: Se remodelan y afianzan los perfiles de cabecera, pie y bordes laterales de la escollera vegetalizada.

En el esquema siguiente, se reproducen las fases del proceso constructivo de la escollera vegetalizada.

Imagen 206. Fases del proceso constructivo de una escollera vegetalizada. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.



7.3.10.9 Control de calidad

Antes de comenzar el acopio y la instalación de los materiales a emplear, el contratista presentará a la Dirección de la Obra el nombre de los suministradores de estos; así como, sus certificados de garantía.

Como regla general, la construcción de la escollera vegetalizada cumplirá con una serie de requisitos establecidos por la Dirección de obra (DO):

- Los bloques se colocarán en función de lo especificado por la Dirección de obra (DO).
- Los bloques tendrán el tamaño y diámetro equivalente establecido por la DO.
- Se garantizará que, como mínimo, el 80 % de los bloques tengan el peso indicado por la DO.
- Los bloques estarán colocados de manera que no coincidan las juntas verticales.
- Se asegurará que el frente sea uniforme y que no haya bloques sobresalientes o hundidos respecto a la superficie general de acabado.
- El ancho y el espesor de las capas no serán inferiores a los valores previstos en el proyecto correspondientes a la cota de trabajo.
- Las tolerancias de ejecución no sobrepasarán los valores siguientes:
 - Longitud: $\pm 3 \%$.
 - Anchura: $\pm 3 \%$.
 - Planeidad: - 30 mm, + 120 mm.
 - Altura: $\pm 5 \%$.

En el caso del material vegetal vivo, concretamente las estacas o varas, la procedencia será de zonas próximas a la obra. En el caso de planta de vivero se certificará el origen del material, que será preferentemente de Bizkaia. En ambos casos, se considera admisible hasta un 30 % de marras o pérdidas durante el primer año.

El director de la obra podrá exigir en cualquier momento la realización de cualquiera de los siguientes ensayos:

- Ensayos geométricos (Granulometrías y forma UNE EN 13383-2, proporción de superficies trituradas o rotas UNE EN 13383-1).
- Ensayos físicos (Densidad seca UNE EN 13382-2, resistencia a compresión simple UNE EN 1926, integridad de bloques UNE EN 13383-1, resistencia a la fragmentación UNE EN 1097-2).
- Ensayos del material vegetal: se recomienda la realización de ensayos de caracterización del sistema radical; así como, la medición de la biomasa aérea de la planta. Se recomienda realizar ensayos a cortante (in situ o/y en laboratorio) de muestras de suelo con y sin raíces.

En caso de realizarse una cata o trinchera para el estudio del sistema radical, se tomarán muestras de raíces para la realización de ensayos a tracción de estas (De Baets et al., 2008). Para la caracterización de la distribución del sistema radical con la profundidad, se seguirán las recomendaciones de Böhm (1979). En el epígrafe 3.3.1 se incorpora con ejemplos de valores de las características biotécnicas de las especies más utilizadas en Bizkaia.

7.3.10.10 Medición y abono

Las escolleras se medirán por toneladas (t) realmente colocadas, y en su medición, además de la propia escollera, se considerarán incluidas su suministro, el vertido y la colocación e integración del elemento vegetal.

Independientemente de que su uso esté destinado a la protección de taludes o desmontes, resultando exclusivamente el peso de la piedra de tamaño medio la que clasifique el tipo de escollera.

7.3.10.11 Recomendaciones

- Tener en cuenta la importancia de la época para la colocación del material y elección de su tipología.
- Verificar que el material tenga conexión con el trasdós de la obra.
- Comprobar que el material tiene la longitud adecuada al tamaño de la escollera prevista.
- Comprobar que las dimensiones de los bloques de piedra garanticen la estabilidad de la estructura.
- Comprobar que se rellena y compacta adecuadamente los huecos entre los bloques.
- Aviverar el material en obra y utilizar sólo el material necesario. En el caso de emplear planta enraizada en alveolo, es posible que se requiera riego de apoyo durante los primeros meses.

7.3.10.12 Propuesta de precio descompuesto: escollera vegetada

Tn Cimentación de muro de escollera.					
Cimentación de muro de escollera, de bloques de piedra caliza, cansada, colocados con retroexcavadora sobre cadenas con pinza para escollera y relleno de los huecos existentes entre los bloques con hormigón HM-15/PV40II fabricado en central y vertido desde camión.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	t	Materiales	1,00	13,00 €	13,00 €
	m³	Block de piedra caliza, cansada	0,18	40,26 €	8,19 €
Subtotal materiales:					21,19 €
2	%	Equipo y maquinaria	0,13	117,21 €	15,43 €
	%	Retroexcavadora sobre cadenas, de 118 kW, con pinza para escollera			
Subtotal equipo y maquinaria:					15,43 €
3	%	Mano de obra	0,01	24,89 €	0,25 €
	%	Capataz Obra civil	0,15	22,07 €	3,31 €
	%	Oficial 1ª construcción de obra civil	0,18	18,00 €	3,24 €
	%	Peón ordinario construcción	0,21	18,00 €	3,78 €
Subtotal mano de obra:					7,58 €
4	%	Costes directos complementarios	0,02	25,17 €	0,50 €
	%	Costes directos complementarios			
Coste de mantenimiento decenal: 9,00 € en los próximos 10 años			Costes directos (1+2+3+4):		40,34 €

Imagen 207. Precio descompuesto de cimentación de escollera. Referencia de precios: Base de precios de edificación y urbanización (Gobierno Vasco, 2021)

Tn Cuerpo del muro de escollera vegetada					
Construcción de muro de escollera vegetada, de bloques de piedra caliza, cansada, colocados con retroexcavadora sobre cadenas con pinza para escollera, colocación de material vegetal y relleno de los huecos existentes entre los bloques inerte temoso o suelo estructural					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1	t	Materiales	1,00	13,00 €	13,00 €
	m³	Suelo estructural 0,25 tracción +0,25 permeabilidad	0,26	15,40 €	3,99 €
	m³	Esqueja o plantón en obra	1,06	2,70 €	2,84 €
Subtotal materiales:					19,83 €
2	%	Equipo y maquinaria	0,13	117,21 €	15,43 €
	%	Retroexcavadora sobre cadenas, de 118 kW, con pinza para escollera			
3	%	Mano de obra	0,01	24,89 €	0,25 €
	%	Capataz Obra civil	0,15	22,07 €	3,31 €
4	%	Costes directos complementarios	0,02	25,17 €	0,50 €
	%	Costes directos complementarios			
Coste de mantenimiento decenal: 18,57 € en los próximos 10 años			Costes directos (1+2+3+4):		44,57 €

Imagen 208. Precio descompuesto de escollera vegetada. Referencia de precios: Base de precios de edificación y urbanización (Gobierno Vasco, 2021)

7.3.10.13 Cálculo

7.3.10.14 Cálculo de la estabilidad de la escollera vegetada

En la Fase 1 de la vida de servicio de una escollera vegetada, durante la cual las labores de refuerzo y estabilización están desarrolladas principalmente por los materiales inertes (naturales y/o manufacturados) empleados en la obra, los parámetros que rigen las comprobaciones de estabilidad, equivalentes al de una escollera tradicional, son los siguientes:

Parámetros de la escollera:

- Peso específico seco de las rocas empleadas.
- Peso específico aparente de la escollera.
- Porosidad de la escollera.
- Ángulo de rozamiento interno de la escollera.

Todos los anteriores parámetros están definidos y explicados en numerosas publicaciones —por ejemplo, en la Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera (Ministerio de Fomento, 2006).

Parámetros de los rellenos y terrenos del trasdós e intradós (zona de la puntera y frente de las hileras de fundación):

- Parámetros resistentes de los suelos y rellenos que se expresarán, en general, en términos de cohesión y ángulo de fricción interna. Los valores de estos parámetros variarán en función de que se realice un análisis de estabilidad en el corto o en el largo plazo (condiciones no drenadas y drenadas, respectivamente).
- Geometría (inclinación) de los terrenos y rellenos del trasdós de la escollera.

En la FASE 3 (ver epígrafe 3.2) es necesario conocer algunas características del material vivo empleado. Esta información se puede obtener a través de ensayos en campo (Böhm, 1979) y/o a partir de la bibliografía existente. Los parámetros que se utilizan en estas fases son:

- Especies vegetales empleadas (estarán adaptadas a las condiciones en la que tendrán que desarrollarse).
- Resistencia a tracción de las raíces.
- Resistencia al arranque del sistema radical (pull out strength): este parámetro está relacionado con el anterior. En caso de no encontrar información específica sobre la resistencia al arranque de la especie utilizada en la obra, esta se podrá calcular de forma aproximada aplicando un factor de 0,65 (Norris, 2005) o 0,6 (Greenwood, 2006) sobre valor de la resistencia a tracción de la raíz.

En el epígrafe 4.3.1. *Materiales vegetales vivos y propiedades biotécnicas* se detallan las características biológicas y técnicas de las especies más utilizadas en Bizkaia.

a) Estabilidad interna

El parámetro que controla esta comprobación es el ángulo de fricción interna de la escollera. Este se calcula a partir de:

- Ángulo de rozamiento básico que corresponde a aquel de una escollera vertida.
- Factor que aumenta ligeramente al anterior en función de las condiciones y calidad de la ejecución de la escollera.
- Factor que reduce la suma de los anteriores valores y que es función del valor de las tensiones normales.

En la página 36 de la Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera (Ministerio de Fomento, 2006) se incluye una tabla (tabla 4.2) donde se pueden encontrar valores para los dos

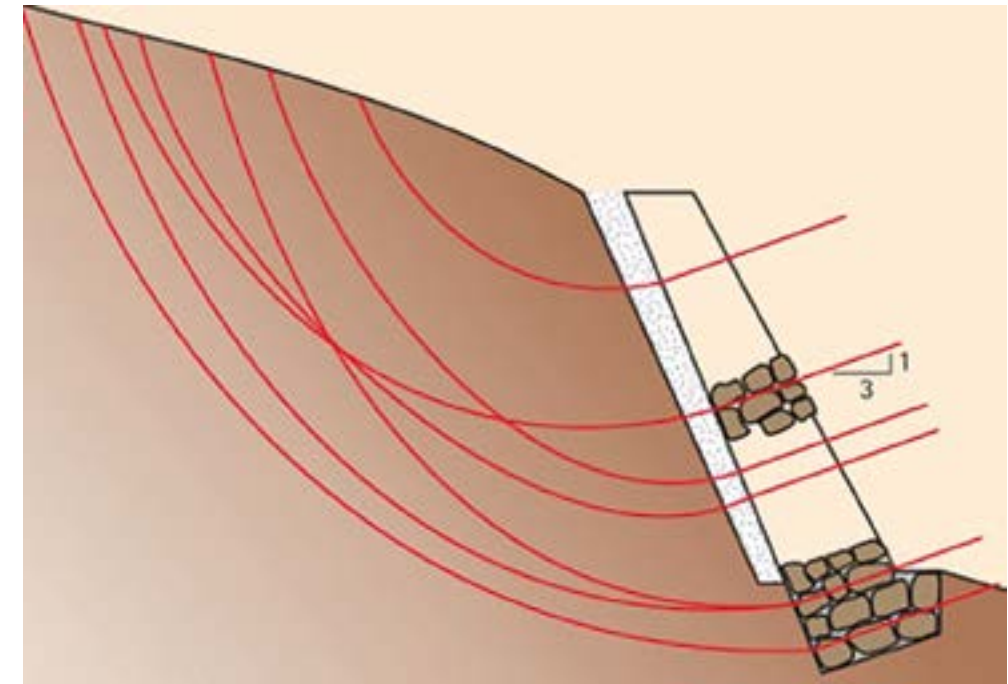


Imagen 209. Fases del proceso constructivo de una escollera vegetalizada. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L.

primeros términos del ángulo de rozamiento interno de la escollera. En la página 37, por su parte, se incluye la expresión para calcular el término relacionado con los valores de las tensiones normales.

Se calculará el ángulo de rozamiento interno de la escollera para la hilera más baja por ser esta la que está sujeta al valor máximo de presión lateral (calculada de acuerdo con la teoría de empujes de tierras). Se supondrá que la escollera tiene este valor en todo su cuerpo.

La comprobación de estabilidad interna se realizará mediante el uso de programas de análisis de estabilidad de taludes, en los que se definirá una superficie de deslizamiento con una inclinación a través del cuerpo de la escollera similar a la de la colocación de las hileras (aproximadamente igual a 3H:1V).

La escollera se simulará como un material granular (cohesión = 0 kPa) y con un ángulo de rozamiento igual al ángulo de rozamiento interno de la escollera calculado de acuerdo con las anteriores indicaciones. El factor de estabilidad calculado será el factor de estabilidad interna de la escollera.

b) Estabilidad externa

Los distintos factores de comprobación de la estabilidad externa de la FASE 1 están definidos en numerosas publicaciones del ámbito de la ingeniería tradicional.

En el presente documento se incluyen solamente las expresiones de los factores de estabilidad de la escollera vegetada que muestran los efectos de la vegetación (FASE 3). Por tanto, se trata de comprobaciones de estabilidad en el largo plazo en la que la vegetación ya ha tenido tiempo suficiente para desarrollarse y reforzar la estabilidad de la estructura. Las expresiones se han desarrollado y modificado a partir del trabajo de Gray & Sotir (1996).

Seguridad frente al deslizamiento (Tardío & Mickovski, 2016)

$$F_{\text{deslizamiento}} = \frac{(W + P_A \sin \varphi_w) \cdot \tan \varphi_b + T_{\text{PULL-OUT}}}{P_A \cos \varphi_w}$$

Donde:

$$P_A = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H^2$$

(Empuje activo del terreno (kN))

K_a : coeficiente de empuje activo.

γ : peso específico del terreno (kPa).

H: altura de la escollera (m).

Φ_b : ángulo de rozamiento interno del terreno (°).

Φ_w : ángulo de rozamiento escollera-terreno (°). Se puede adoptar un valor de $0,8 \cdot \Phi_b$.

W: peso de la escollera calculado a partir de su peso específico aparente (kN).

$T_{PULL-OUT}$: fuerza de resistencia al arranque (kN). Se calcula a partir del número de plantas y de la resistencia al arranque de cada una de ellas. En caso de carecer de información experimental o de trabajo de campo, se puede calcular de forma aproximada a partir de la siguiente expresión:

$$T_{PULL-OUT} = 0.6 \cdot cr(t) \cdot H$$

(Norris, 2005; Greenwood, 2006)

Donde:

$cr(t)$ es la cohesión adicional debida a las raíces (su cálculo se muestra en el epígrafe 5.3.2). La superficie sobre la que actúa la cohesión adicional sería el plano inclinado del relleno que es atravesado por las raíces. Se ha preferido dejar el valor de la altura del muro (H) por estar el resultado del lado de la seguridad.

Seguridad frente al vuelco (Tardío & Mickovski, 2016)

$$F_{vuelco} = \frac{W \cdot x_1 + T_{PULL-OUT} \cdot x_2}{(P_A \cos \varphi_w) \cdot x_3}$$

Donde:

x_1 : abscisa del centro de gravedad de la escollera respecto a la puntera.

Se puede calcular a partir de programas CAD.

x_2 : brazo de la fuerza de resistencia al arranque de la vegetación que atraviesa el plano de apoyo del relleno de la escollera = H/2.

x_3 : brazo del empuje activo del terreno = H/3.

c) Estabilidad global

La estabilidad global de la escollera en la Fase 1 se calculará utilizando las metodologías de análisis de estabilidad de taludes. Se recomienda utilizar métodos de equilibrio de límites exactos; es decir, métodos que tengan en cuenta el equilibrio de fuerzas y el equilibrio de momentos (por ejemplo, método Morgenstern-Price, método Spencer, método GLE, método Borselli, etc.).

En la FASE 3, la única modificación a incluir en el análisis de estabilidad consiste en incorporar la cohesión adicional debida a las raíces en las zonas del terreno explorada por las mismas (ver epígrafe 6.3.2). Para ello es necesario conocer la profundidad máxima que alcanza el sistema radical de la especie o especies empleadas en la obra.

También se puede inferir la profundidad del aparato radical a partir de la alometría de la especie vegetal (ver el epígrafe 6.3.2).

De acuerdo con trabajos existentes (Fernandes & Guiomar, 2016), en la situación más desfavorable, siempre y cuando no existan otros datos disponibles, se puede considerar una profundidad mínima del suelo explorado por las raíces igual a 0,5 metros (para el caso de vegetación leñosa).

En general, los valores mínimos recomendados para los distintos factores de estabilidad anteriormente mostrados serán los siguientes:

- FS deslizamiento > 1,5
- FS vuelco > 2,0
- FS global > 1,5

En cualquier caso, el factor de estabilidad que definirá el valor mínimo a cumplir será el correspondiente a la estabilidad global (conjunto escollera-terreno). Una vez definido el valor mínimo de este, el resto de los factores de estabilidad serán iguales o mayores al anterior.

7.3.10.15 Efectos del desarrollo de la vegetación en las comprobaciones de estabilidad

Se analizan en el epígrafe 6.3.



8. CONTROL DE CALIDAD, MANTENIMIENTO, SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN

Las técnicas requieren mucho material vegetal por lo que se debe contar con una zona en obra para poderla aviverar en arena húmeda o en agua por un periodo no superior a dos días

8.1 CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad de las obras de bioingeniería hace referencia a los ensayos y especificaciones que debe cumplir tanto los materiales como la ejecución de las técnicas de bioingeniería.

En las técnicas se han incluido algunas cuestiones específicas relativas al control de calidad. En este apartado se recogen la totalidad de los controles y ensayos que el director de obra, según su criterio, debe demandar.

8.1.1 Material vegetal

Se recomienda la realización de ensayos de caracterización del sistema radical, así como la medición de la biomasa aérea de la planta. Se recomienda realizar ensayos a cortante (in situ o/y en laboratorio) de muestras de suelo con y sin raíces. En caso de realizarse una cata o trinchera para el estudio del sistema radical, se tomarán muestras de raíces para la realización de ensayos a tracción de estas (De Baets et al., 2008). Para la caracterización de la distribución del sistema radical con la profundidad, se seguirán las recomendaciones de Böhm (1979). En el apartado Cálculo se incorpora la tabla con ejemplos de valores de las características biotécnicas de las especies más utilizadas en Bizkaia.

La ejecución se llevará a cabo en la época de parada vegetativa, excepto si se utiliza arbolado en contenedor forestal.

Las técnicas requieren mucho material vegetal por lo que se debe contar con una zona en obra para poderla aviverar en arena húmeda o en agua por un periodo no superior a dos días.

8.1.2 Bloques, lajas de piedra

Como regla general, en relación con los materiales pétreos, se cumplirá con una serie de requisitos establecidos por la Dirección de obra (DO):

- Los bloques se colocarán en función de lo especificado por la Dirección de Obra (DO).
- Los bloques tendrán el tamaño y el diámetro equivalente establecido por la DO.
- Se garantizará que, como mínimo, el 80 % de los bloques tengan el peso indicado por la DO.
- Los bloques se colocarán de modo que no coincidan las juntas verticales.
- Se asegurará que el frente sea uniforme y que no haya bloques sobresalientes o hundidos respecto a la superficie general de acabado.
- El ancho y el espesor de las capas no serán inferiores a los valores previstos en el proyecto correspondientes a la cota de trabajo.
- Las tolerancias de ejecución no sobrepasarán los valores siguientes:
 - Longitud: $\pm 3 \%$.
 - Anchura: $\pm 3 \%$.
 - Planeidad: - 30 mm, + 120 mm.
 - Altura: $\pm 5 \%$.

8.1.3 Madera

Como regla general, en relación con la madera, se cumplirá con una serie de requisitos establecidos por la Dirección de obra (DO):

- Las tolerancias de ejecución no sobrepasarán los valores siguientes:
 - Longitud: $\pm 3 \%$.
 - Diámetro: $\pm 3 \%$.
- La madera tendrá certificado SCF.

8.1.4 Ensayos

El director de la obra podrá exigir en cualquier momento la realización de cualquiera de los siguientes ensayos:

- Ensayos geométricos (Granulometrías y forma UNE EN 13383-2, proporción de superficies trituradas o rotas UNE EN 13383-1).
- Ensayos físicos (Densidad seca UNE EN 13382-2, resistencia a compresión simple UNE EN 1926, integridad de bloques UNE EN 13383-1, resistencia a la fragmentación UNE EN 1097-2).
- Ensayos y medidas de tolerancia en madera UNE-EN 336:2014.
- Ensayo y contenido de humedad en la madera UNE-EN 13183-1:2002; UNE-EN 13183-1:2003 Erratum; UNE-EN 13183-1/AC 2004.
- Ensayos de material vegetal descritos en el punto 7.1.1.

8.2 MANTENIMIENTO

La bioingeniería del paisaje implica la utilización de estructuras vivas, de ahí que sea necesario llevar a cabo determinadas funciones de mantenimiento. Sin embargo, se trata de un mantenimiento de tipo extensivo dirigido principalmente a garantizar el desarrollo adecuado de la vegetación, su funcionalidad a largo plazo y su evolución esperada dentro de la serie de vegetación objetivo que se haya definido.

La necesidad de mantenimiento se debe determinar mediante inspecciones periódicas establecidas en el plan de seguimiento (ver apartado 8.3. *Seguimiento y evaluación en las obras de bioingeniería*) y se llevará a cabo solo cuando sea necesario. Se deben adecuar las labores de mantenimiento a las condiciones y procesos naturales y evitar acciones innecesarias que puedan resultar negativas para el correcto desarrollo de la obra.

Junto con las medidas de mantenimiento regular, pueden ser necesarios, en algún momento de la vida de la obra, medidas de mantenimiento extraordinarias, necesarias tras acontecimientos extraordinarios o imprevistos (inundaciones, plagas, especies neófitas invasoras, viento, nieve húmeda, etc.).

La planificación de los trabajos de mantenimiento se establece en base al programa o plan de seguimiento adoptado, en el que se describen los objetivos, el tipo de intervención, los trabajos necesarios, la época a realizar y el presupuesto. Se deberá acompañar de mapas, dibujos, croquis, perfiles, tablas y planos que sean necesarios.

A continuación, se mencionan algunas de las tareas de mantenimiento, sin que esta lista sea exhaustiva.

Para **especies herbáceas** se pueden utilizar las medidas de mantenimiento:

- Siega (parcial, a lo largo de franjas, estacional, en función de la maduración de semillas y frutos, utilizando herramientas y métodos adaptados al biotopo.

La planificación de los trabajos de mantenimiento se establece en base al programa o plan de seguimiento adoptado, en el que se describen los objetivos, el tipo de intervención, los trabajos necesarios, la época a realizar y el presupuesto

El seguimiento se refiere al proceso sistemático y continuo de recopilación, análisis y utilización de información para supervisar el progreso de un programa con objeto de cumplir sus objetivos y guiar las decisiones de gestión

- Resiembra, en caso de fallos de siembra (en periodo favorable y dentro del mismo año en el que se ha realizado la siembra).
- Instalación de tepes, plantas nuevas o partes de plantas.
- Riego, en caso necesario (en verano, en condiciones de sequía prolongada).
- Recogida y retirada de basuras y desperdicios.

En el caso de **árboles y arbustos**, pueden aplicarse las medidas:

- Rejuvenecimiento mediante recepado (cada cuatro o seis años en función de las especies).
- Aclareo / eliminación de plantas individuales por motivos hidráulicos, ecológicos o estéticos. (a partir del tercer año, revisar cuando sea necesario).
- Poda (cuando sea necesario, una vez al año máximo).
- Eliminación de especies invasoras, como la Robinia mediante anillado.
- Reposición de marras, en función de los criterios previamente establecidos (en periodo favorable y dentro del periodo de garantía de la obra).
- Riego, en caso necesario, sobre todo en las dos primeras estaciones vegetativas, en condiciones de sequía prolongada.
- Recogida y retirada de basuras y desperdicios.

Intervalos de mantenimiento. La sucesión oportuna de intervenciones de mantenimiento se define en función de:

- Objetivo de desarrollo.
- Criterios y perspectivas botánicas y biológicas de los trabajos.
- Consideraciones hidráulicas, hidrológicas, geotécnicas y de seguridad.
- Consideraciones ecológicas y de conservación de la naturaleza.
- Consideraciones estéticas paisajísticas.
- Necesidad de material vivo para la construcción de otras intervenciones de bioingeniería del paisaje.
- Accesibilidad.

8.3 SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DE LAS OBRAS DE BIOINGENIERÍA

El **seguimiento** se refiere al proceso sistemático y continuo de recopilación, análisis y utilización de información para supervisar el progreso de un programa con objeto de cumplir sus objetivos y guiar las decisiones de gestión.

Imagen 210. Verificación mediante tensiómetro de un entramado de madera de 15 años. Fuente: P. Sangalli - SCIA S.L. - y G. Tardío



La **evaluación** consiste en medir y valorar dichos progresos en base a los objetivos establecidos siendo una parte consustancial al seguimiento. Toda evaluación debe medir el logro de metas y objetivos de la acción.

El seguimiento y su posterior evaluación es una condición básica para el desarrollo continuo del conocimiento especializado en bioingeniería del paisaje y la calidad y seguridad de sus intervenciones.

Deben garantizarse las condiciones financieras y humanas para el seguimiento, y debe realizarlo personal cualificado.

Las intervenciones que se vayan a supervisar deben tener una ubicación documentada y una descripción de su construcción y mantenimiento. Debe ser posible una evaluación y valoración basadas la elaboración de hojas de cálculo para establecer un seguimiento normalizado.

A continuación, se recogen los elementos establecidos en las Directrices de Bioingeniería del Paisaje de la Federación Europea de Bioingeniería en materia de seguimiento en función del material de construcción vivo e inerte y del cumplimiento de las funciones técnicas, ecológicas, paisajísticas y socioeconómicas.

8.3.1 Estado del material de construcción

Material vivo

A: Especies leñosas árboles y arbustos

- Altura.
- Diámetro (20 y 100 cm sobre el suelo).
- Densidad (nº de brotes/m²).
- Vitalidad (grados de vitalidad según BRAUN 1-5 o ROLOFF 0-3).
- Distribución de especies, etc.

B: Especies herbáceas

- Vitalidad (grados de vitalidad según BRAUN 1-5 o ROLOFF 0-3).
- Grado de cobertura del suelo.
- Distribución de las especies.
- Altura media de las hojas.
- Relación especies herbáceas.

Estado del material de construcción inerte

- Estado de los troncos: grado de deterioro (control visual, control técnico con un resistómetro, etc.).
- Estado de los clavos y alambres.
- Estado de otros materiales.
- Grado de descomposición del material de construcción inerte.

8.3.2 Cumplimento funciones técnicas, ecológicas, paisajísticas y socioeconómicas

Funcionalidad geotécnica y de seguridad

- Estabilidad.
- Durabilidad.
- Función técnica de seguridad.
- Grado de cumplimiento del objetivo de consolidación biotécnica.
- Grietas.

Las intervenciones que se vayan a supervisar deben tener una ubicación documentada y una descripción de su construcción y mantenimiento. Deben ser posibles una evaluación y valoración basadas la elaboración de hojas de cálculo para establecer un seguimiento normalizado



Imagen 211. Verificación del desarrollo de la vegetación. Fuente: P. Cornelini

- Roturas de pendiente.
- Formas inestables de los brotes.
- Existencia de infiltraciones.

Cumplimientos objetivos o funciones ecológicas

- Creación de hábitats.
- Diversidad de hábitats.
- Red de hábitats.
- Grado de consecución de la vegetación objetivo / grado de naturalidad.
- Bioindicadores.

Funciones estéticas del paisaje

- Evaluación de la integración en el paisaje.

Funciones socioeconómicas

- Análisis de costes y beneficios.
- Turismo.
- Ocio.
- Valor de uso y experiencia humana.
- Referencia de identidad.

8.3.3 Evaluación global

- Elección del método de construcción: mejor adaptado al cumplimiento de los objetivos de desarrollo.
- Elección de materiales mejor adaptados al método de construcción respectivo.
- Uso preferente u obligatorio de material de construcción inerte local, semillas autóctonas y material vegetal adaptado y adecuado a las exigencias de la construcción.
- Certificación de origen (geotextiles de coco o yute, por ejemplo).
- Elaboración de una ficha de seguimiento en al que se indique el tipo de intervención a realizar y el calendario previsto.

A continuación, se muestra el ejemplo de una ficha de seguimiento y evaluación tipo:

A la hora de escoger los materiales, se optará por los mejor adaptados al método de construcción respectivo

SEGUIMIENTO EN OBRA					
Localidad					
Proyecto n°			Fecha		
Altitud		Exposición e		REF (Plano adjunto)	
Nombre persona responsable					
Tel.					
E-mail					
Proyectistas					
DO			Asistencia DO		
Director técnico de la empresa					
Empresa constructora					
Dirección			Ciudad		
Tel./mail					
Subcontrata			Subcontrata		
Fecha inicio y final obra (según contrato)					
Eventuales interrupciones de los trabajos , motivo y duración					
Periodo en el que se ha instalado el material vivo : de la semana * a la semana					
Periodo de plantaciones : de la semana * a la semana					
Imprevistos de obra :					
Eventuales fenómenos atmosféricos posteriores a la ejecución :					
Otros					
EVALUACIÓN ESTADO OBRA SEGUN FICHA ADJUNTA					
ACTUACIONES PREVISTAS Y FECHA					
PROXIMO SEGUIMIENTO					
Medios mecánicos en obra (indicar * si de alquiler)					
Retroexcavadora de Ruedas		Dumper		Camión	
Retroexcavadora de orugas		Grúa de cable		Otros (Especificar)	
Ecavador tipo araña		Motosierra			
Pala mecánica		Taladro			
Tractor		Compresor			
Hidrosembradora		Grupo electrógeno			
Especies vegetales utilizadas					
Plantas enraizadas Adjuntar albarán (Especie , código europeo producción , Ø, altura...)			Fragmentos de planta : Estacas (E), Varas(V) Ramaje(R) Especie y dimensiones medias		
		Estado			Estado

EVALUACIÓN

ORGANIZACIÓN OBRA	
PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	uso de equipos inadecuados, obra mal organizada, equipo de trabajadores descoordinado
3	equipamiento sólo parcialmente adecuado, obra sólo bien organizada para determinadas fases
5	trabajadores bien organizados, equipos adecuados, obra bien organizada en su conjunto
CUMPLIMIENTO DEL PROYECTO (CALIDAD)	
PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	incumplimiento del proyecto y/o falta de realización de las obras
2	cumplimiento parcial del proyecto y/o con cambios perjudiciales sustanciales
3	trabajo realizado en su conjunto según el plan sin modificaciones sustanciales
4	realización según lo previsto
5	realización óptima con mejoras
SEGURIDAD	
PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	plan de seguridad genérico, que no contiene especificaciones para la ejecución de las obras IN
3	plan de seguridad que contiene sólo algunas indicaciones para las obras IN
5	plan de seguridad con todas las indicaciones para las obras IN
DISPONIBILIDAD DE MATERIAL VEGETAL (ESQUEJES)	
PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	disponibilidad de material a distancias superiores a 20 km de la obra
3	disponibilidad de material a distancias de entre 5 y 20 km de la obra
5	disponibilidad de material a distancias inferiores a 5 km de la obra
DISPONIBILIDAD DE MATERIALES VEGETALES (PLANTAS)	
PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	disponibilidad y disponibilidad fraccionada en viveros numerosos y/o distantes
3	disponibilidad en un número determinado de viveros y/o para cantidades limitadas
5	disponibilidad a corto plazo en algunas guarderías
GESTIÓN DEL MATERIAL VIVO RECIÉN PLANTADO	
PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	no se tienen en cuenta las necesidades del material vivo que llega a la obra
3	sólo se toman algunas precauciones para la manipulación de material vivo (por ejemplo, luz o agua)
5	buena atención a cada factor del material que llega
GESTIÓN DEL MATERIAL VEGETAL EXISTENTE	
PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	no consideración del material preexistente en la obra, uso intensivo de medios mecánicos, no reutilización del material para la construcción
3	preservación únicamente de las grandes plantas existentes en el lugar, falta de competencia para sustituir correctamente el material cortado, cumplimiento formal del Decreto Presidencial de 14/4/93
5	buen cuidado del material existente, en la medida de lo posible preservación de la vegetación y reutilización de la vegetación talada, cumplimiento sustancial del Decreto Presidencial 14/4/93

ESPECIES VEGETALES UTILIZADAS	
PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	uso predominante de especies no autóctonas
3	utilización de especies principalmente autóctonas sin tener apenas en cuenta sus características biotécnicas
5	especies autóctonas con características biotécnicas adecuadas
TAMAÑO DEL MATERIAL LEÑOSO VIVO (PLANTAS, ESQUEJES, RAMAS ; VARAS)	
PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	las dimensiones, la longitud y el diámetro del material utilizado no son adecuados
3	las dimensiones, la longitud y el diámetro del material utilizado son parcialmente adecuados
5	las dimensiones, la longitud y el diámetro del material utilizado son adecuados
TAMAÑO DEL MATERIAL DE MADERA MUERTA (TRONCOS; PIQUETAS, ETC.)	
PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	las dimensiones, la longitud y el diámetro del material utilizado no son adecuados
3	las dimensiones, la longitud y el diámetro del material utilizado son parcialmente adecuados
5	las dimensiones, la longitud y el diámetro del material utilizado son adecuados
DIMENSIONES DEL MATERIAL DE HIERRO/ACERO	
PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	las dimensiones, la longitud y el diámetro del material utilizado no son adecuados
3	las dimensiones, la longitud y el diámetro del material utilizado son parcialmente adecuados
5	las dimensiones, la longitud y el diámetro del material utilizado son adecuados
PERIODO DE PLANTACIÓN DE LAS ESPECIES VEGETALES	
PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	periodo estacional inadecuado
3	periodo estacional parcialmente adecuado
5	periodo estacional adecuado
NÚMERO DE TRABAJADORES	
PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	los trabajadores son insuficientes en número y no están cualificados
2	los trabajadores son insuficientes pero parcialmente especializados
3	el número de trabajadores no siempre es suficiente, aunque estén especializados para el tipo de trabajo realizado: un mayor número de trabajadores haría el trabajo más fluido y menos pesado
4	los trabajadores son suficientes y están parcialmente especializados
5	los trabajadores son adecuados en número y especializados para el tipo de trabajo realizado

Valoración:

- De 40-65 puntos: Tipo de intervención buena a óptima.
- De 16-39 puntos: Tipo de intervención mediocre, con puntos importantes a mejorar.
- 15 puntos o menos: Tipo de intervención mala a pésima y poco recorrido de mejora.



Imagen 212. Prueba de resistencia. Fuente: P. Cornellini

8.4 Límites de aplicación

La Bioingeniería del Paisaje, aunque tienen una aplicación cada vez más amplia a medida que se desarrollan mejor los cálculos y las estructuras, sigue teniendo limitaciones, y hay que reconocer que estas técnicas no pueden aplicarse de manera uniforme en todas partes (Adam et al., 2008). Estas limitaciones están vinculadas principalmente a aspectos biológicos, técnicos y temporales relacionados con el uso de materiales de construcción vivos (Menegazzi et al. 2014).

A-Limitaciones biológicas de las plantas

Existen zonas donde no se dan las condiciones para el correcto desarrollo de plantas superiores: límites altitudinales de la vegetación, elevada contaminación del agua, zonas desérticas o muy áridas etc.

Se requiere una gran cantidad de material vegetal para la realización de las obras, que no siempre está disponible en la zona de intervención o en su proximidad.

Dependiendo del contexto del lugar en el que se trabaje y del desarrollo vegetal obtenido, a veces es necesario garantizar un mantenimiento regular de las formaciones vegetales plantadas.

B-Limitaciones técnicas

Cada técnica tiene un límite de aplicabilidad, que en el caso de la ladera dependerá de las características geotécnicas del ámbito, así como de la pendiente de esta.

La estabilización de laderas y taludes con plantas solo es posible en la capa del suelo en la que pueden penetrar las raíces. La inestabilidad del suelo en profundidad sólo puede evitarse indirectamente, por ejemplo, mediante el drenaje del agua por la vegetación. Se considera que la vegetación puede por sí sola estabilizar hasta el metro de profundidad, mientras que, con la ayuda de estructuras, esta estabilidad puede llegar hasta los tres metros de profundidad. Así mismo, se

puede dar una limitación en cuanto a pendiente. Para pendientes superiores a 70° la vegetación apenas recibe agua de la precipitación y por tanto no se dan las condiciones para su desarrollo.

Por otro lado, es necesario disponer de personal cualificado y entrenado para la ejecución de obras de bioingeniería. La mano de obra incide de manera notable en el coste de las obras y en el éxito de estas y, por supuesto, todos los proyectos requieren una supervisión científica y técnica competente y seria.

C-Límites temporales

La mayor parte de las técnicas que utilizan fragmentos de planta no enraizada (estacas, varas, ramas) o plantas a raíz desnuda deben aplicarse en periodo de reposo vegetativo que, dependiendo de las zonas, puede ir de octubre-noviembre a marzo-abril. Fuera de esta época, el resultado de la brotación es muy inferior, lo que condiciona el éxito y la función de la vegetación en la estabilización. Existen métodos, como la conservación en frío y la utilización de hormonas de enraizamiento que permiten alargar el periodo de utilización de las técnicas, o alargando el periodo sólo unas pocas semanas más, pero se recomienda utilizar estos métodos sólo en casos puntuales.

En el caso de llevar a cabo obras en otras épocas, se deben emplear plantas en contenedor forestal para las estructuras y seguramente serán necesarios riegos de apoyo durante el primer año, desde finales de primavera hasta finales de verano.

Por otro lado, los resultados no siempre son visibles, ya que hay que esperar uno o varios periodos de vegetación, y la vuelta a un estado natural puede percibirse como una vuelta a un estado salvaje, incontrolado y abandonado. Aunque la eficacia de la bioingeniería es real, también es necesario trabajar desde un punto de vista social y político a través de la educación y la concienciación pública.

A modo de resumen se pueden indicar las ventajas e inconvenientes del uso de la Bioingeniería del Paisaje en obra civil resumidas en la siguiente tabla (Menegazzi et al., 2014).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Deformabilidad de las estructuras y capacidad de regeneración de las partes dañadas	Menor posibilidad de elección entre materiales, que suelen estar bien caracterizados, por ejemplo, las plantas
Capacidad de adaptación a los cambios del entorno	Parámetros de diseño menos precisos y procedimientos de construcción menos normalizados
Menor impacto ambiental y, a menudo, mejor calidad ambiental	Mayor tiempo para alcanzar la plena funcionalidad
Por lo general resultan más económicas y tienen mejor balance energético	Limitaciones técnicas, biológicas y temporales; mayor influencia de los factores medioambientales
Mayor funcionalidad con el paso del tiempo	Requiere un cierto mantenimiento y seguimiento de manera regular durante los primeros años tras la implantación, aunque con intensidad decreciente

La mano de obra incide de manera notable en el coste de las obras y en el éxito de estas y, por supuesto, todos los proyectos requieren una supervisión científica y técnica competente y seria

Cada técnica tiene un límite de aplicabilidad, que en el caso de la ladera dependerá de las características geotécnicas del ámbito, así como de la pendiente de esta



9. NORMATIVA GENERAL

En este capítulo se recogen las principales Normas referidas a las técnicas de Bioingeniería del Paisaje incluidas en este manual principalmente Normas UNE, Normas NTJ y otras normas.

9.1 UNE

Las normas UNE hacen referencia al suelo, áridos, escolleras, geotextiles y cálculo de las técnicas.

UNE 103104. Determinación del límite plástico de un suelo.

UNE 103204. Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico.

UNE 103205. Determinación del contenido de sales solubles de un suelo.

UNE 103406. Ensayo de colapso en suelos.

UNE 103601. Ensayo del hinchamiento libre de un suelo en edómetro.

UNE 146510. Estabilidad de los áridos y fragmentos de roca frente a la acción de inmersión en agua.

UNE 146510. Estabilidad de los áridos y fragmentos de roca frente a la acción de inmersión en agua.

UNE 146511. Estabilidad de los áridos y fragmentos de roca frente a la acción de los ciclos de humedad-sequedad.

UNE-EN 1997-1: Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico Parte 1: Reglas generales.

UNE-EN 1097-2. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.

UNE-EN 12370. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales.

UNE-EN 13383-1. Escolleras. Parte 1: Especificaciones.

UNE-EN 13383-2. Escolleras. Parte 2: Métodos de ensayo.

UNE-EN 1367-2. Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. Parte 2: Ensayo de sulfato de magnesio.

UNE-EN 1744-3. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 3: Preparación de eluatos por lixiviación de áridos.

UNE-EN 1926. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a compresión.

UNE-EN 918. Geotextiles y productos relacionados. Ensayos de perforación dinámica (ensayo por caída de un cono).

UNE-EN ISO 10319. Geotextiles. Ensayo de tracción para probetas anchas.

UNE-EN ISO 11058. Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Determinación de las características de permeabilidad al agua perpendicularmente al plano sin carga.

UNE-EN ISO 12236. Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Ensayo de punzonado estático (ensayo CBR).

UNE-EN ISO 12956 Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Determinación de la medida de abertura característica.

UNE-ENV ISO 10722-1 Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Procedimiento para simular el deterioro durante la instalación. Parte 1: instalación en materiales granulares.

UNE-EN 1995-1-1: 2016. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. AENOR, 2016.

9.2 NORMAS TECNOLÓGICAS NTJ

NORMAS TECNOLÓGICAS de JARDINERÍA Y PAISAJISMO de la FUNDACIÓ DE LA JARDINERIA I EL PAISATGE.

NTJ 12S. Parte 6 Técnicas mixtas de estabilización aplicables en ámbitos fluvial.

NTJ 02A: 2005. Acopio de tierra vegetal de obra.

NTJ 07A:2007. Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo. Calidad general del material vegetal.

NTJ 07D:1996. Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo. Suministro del material vegetal. Árboles de hoja caduca.

NTJ 07E:1997. Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo. Suministro del material vegetal. Árboles de hoja perenne.

NTJ 07F:1998. Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo. Suministro del material vegetal. Arbustos.

NTJ 07I:1995. Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo. Suministro del material vegetal. Trepadoras.

NTJ 07C:1995. Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo. Suministro del material vegetal. Coníferas y resinosas.

NTJ 07V. Plantas autóctonas para revegetación.

NTJ 12S Parte 1. Obras de bioingeniería del paisaje: Técnicas de protección superficial del suelo.

NTJ 12S Parte 2. Obras de bioingeniería del paisaje: Técnicas de estabilización de suelos.

NTJ 12S Parte 4:2015. Obras de bioingeniería del paisaje: Técnicas mixtas de estabilización de taludes.

NTJ 12S Parte 5. Obras de bioingeniería del paisaje: Técnicas de revestimiento y estabilización aplicables en ámbitos fluviales.

9.3 MISCELÁNEA

IAP-11. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carre-tera (IAP-11), Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento Orden FOM /2842/ 2011.

DIN 18918. Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Ingenieurbiologische Sicherungsbauweisen - Sicherungen durch Ansaaten, Bepflanzungen, Bauweisen mit lebenden und nicht lebenden Stoffen und Bauteilen, kombinierte Bauweisen, 2002.

NLT-35.7 Ensayo de carga con placa.

NORMA 5.2 - IC. Drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras.

A photograph of a forest floor. In the foreground, there are several large, weathered logs lying horizontally. The ground is covered with a dense layer of green, leafy shrubs and small plants. In the background, tall, thin trees with bare branches are visible against a light sky. A semi-transparent green rectangular box is overlaid on the right side of the image, containing the text '10. BIBLIOGRAFÍA'.

10. BIBLIOGRAFÍA

10.1 REFERENCIAS GENERALES

- ADAM, P., DEBIAIS, N., GERBER, F. & LACHAT, B. (2008). *Le génie végétal : un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques*. Paris : ministère de L'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire.
- AUTORES VARIOS. (1992). *Primeras Jornadas de Bioingeniería*. Fuenterrabía: AEIP.
- AUTORES VARIOS. (1995). *I Congreso de la Asociación Española de Ingeniería del Paisaje - Libro de Ponencias*. Granada: Ed. Adhara, S.L.
- AUTORES VARIOS. (1999). *III Congreso de la Asociación Española de Ingeniería del Paisaje - Libro de Ponencias*. Bilbao: AEIP.
- AUTORES VARIOS. (1993). *Manuale tecnico di ingegneria naturalistica*. Bologna: Regione Emilia-Romagna e Regione del Veneto.
- AUTORES VARIOS. (2007). *V Congreso de la Asociación Española de Ingeniería del Paisaje - Libro de Ponencias*. Almonte (Huelva): AEIP.
- AUTORES VARIOS. (2009). *VI Congreso de la Asociación Española de Ingeniería del Paisaje - Libro de Ponencias*. Girona: AEIP.
- AUTORES VARIOS (2005). *VI Congreso de la Asociación Española de Ingeniería del Paisaje - Libro de Ponencias*. Pamplona: AEIP.
- CORNELINI, P. & FERRARI, R. (2008). *Manuale di Ingegneria Naturalistica per le scuole secondarie*. Roma: Regione Lazio.
- CORNELINI, P., SAULI G. (2015). *Compendio di Ingegneria Naturalistica per docenti e professionisti: analisi casistica ed elementi di progettazione*. Regione Lazio.
- DE ANTONIS, L., MOLINARI, V. (2003) *Interventi di sistemazione del territorio con tecniche di Ingegneria Naturalistica*. Regione Piemonte, Torino.
- FERRARI, R. (2008). *Quaderni di cantiere. Volume 17: Materiali*. Roma: Regione Lazio.
- FLORINETH, F. (2004) *Pflanzen statt Beton. Handbuch für Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik* Patzer Verlag. Berlin-Hannover
- SAULI, G., CORNELINI, P., PRETI, F. (2005). *Manuale d'Ingegneria Naturalistica. VOLUME 3. Sistemazioni dei versanti*. Regione Lazio, Roma.
- GRAY, D. H. & SOTIR, R. B. (1995). *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization. A Practical Guide for Erosion Control*. New York: John Wiley & Sons, INC.
- GRAY, D. H., SOTIR, R. B. (1996). *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization*. Wiley. New York. p 276.
- NORRIS, J., STOKES, A., MICKOVSKI, S., CAMMERAAAT, E., VAN BEEK, R., NICOLL, B., et al. (2008). *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. Springer, Doordrecht, The Netherlands. Páginas con datos de resistencia media a tracción. pp 87– 90.
- SANGALLI P. (2019). *Manual de Bioingeniería fluvial en ámbito cantábrico*. Proyecto Interreg Poctefa - H2O-Gurea. Gobierno de Navarra.
- SANGALLI P, FERNANDES J.P., TARDÍO G. *Soil and Water Bioengineering as Natural Based Solutions*. C. Catalano et al. (eds). Springer Verlag Future City Urban Serices to Ecosystems. http://doi.org/10.1007/978-3-030-75929-2_17.

- SANGALLI, P. et al. (2010). *Curs de formació en tècniques de bioenginyeria del sòl*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge.
- SANGALLI, P. et al. (2010). *Curso sobre bases para proyectar las técnicas de ingeniería biológica*. Barcelona: Ajuntament de Barcelona/Asociación Española de Ingeniería del Paisaje (AEIP).
- SCHIECHTL, HM. (1992) *Naturnaher Erdbau mit Ingenieurbiologischen Bauweisen Österreichischer Agrarverlag Wien Schiechteln U.1980 Bioengineering in land reclamation and conservation*. The university of Alberta Press, Alberta.
- SCHIECHTL, HM., BERGMANN, W. (1994) *Ingenieurbiologie, Handbuch zum ökologischen Wasser- und Erdbau*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, pp 55–61 and 85–130.
- SCHIECHTL, H. M. & STERN, R. (1992). *Ingegneria naturalistica. Manuale delle opere in terra*. Feltre: Ed. Castaldi.
- SOBOTIK, M., EBERWEIN, R.K., BODNER, G., STANGL, R., LOISKANDL, W. (2020). *Pflanzenwurzeln*. DLG Verlag 316 páginas. ISBN 978-3-7690-0855-5.
- TARDÍO, G., (2013). *Metodología de integración del análisis de erosión de lecho y orillas con el análisis de estabilidad de taludes. Posibles aplicaciones prácticas en los proyectos y obras de restauración fluvial*. “Montes, Revista de Ámbito Forestal”, Nº 112. pp 14 - 19. ISSN: 0027-0105
- SAULI, G. *Manuale D'Ingegneria Naturalistica , volume 2*.
- TRON, S., DANI, A., LAIO, F., PRETI, F., RIDOLFI, L. (2014). *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 14, EGU2012-10739, 2012. EGU General Assembly 2012.
- USDA. (1992). *Soil Bioengineering for Upland Slope Protection and Erosion Reduction*. United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Chapter 18 Engineering Field Handbook Part 650.
- ZEH, H. (2007). *Ingeniería biológica. Manual técnico*. Zurich: Federación Europea de Ingeniería del Paisaje (EFIB-European Federation of Soil and Water Bioengineering).

10.2 REFERENCIAS ESPECÍFICAS

10.2.1 Apartado 3.3.1 Materiales vivos y propiedades biotécnicas

- BISCHETTI, G.B., CHIARADIA, E.A., SIMONATO, T., SPEZIALI, B., VITALI, B. , VULLO, P. & ZOCCO, A. (2005). *Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy*. Plant and Soil 278. pp 11-23.
- BÖHM, W. (1979). *Methods of Studying Root Systems*. Springer Verlag. Berlin, p 275.
- CODER, KIM D. (2014). *Tree Anchorage & Root Strength*. University of Georgia Warnell School of Forestry & Natural Resources monograph publication WSFNR14-9. p 67.
- CORNELINI, P., FEDERICO, C., PIRRERA, G. (2008). *Arbusti autoctoni mediterranei per l'ingegneria naturalistica*. Primo contributo alla morfometria degli apparati radicali, Azienda Regionale Foreste Demaniali Regione Siciliana, Collana Sicilia Foreste, n. 48.
- DE BAETS, S., POESEN, J., REUBENS, B., WEMANS, K. DE BAERDEMAEKER, J. MUYS, B. (2008). *Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength*. Plant Soil 305. pp 207–226.
- LAIO, F., D'ODORICO, P., RIDOLFI, L. (2006). *An analytical model to relate the vertical root distribution to climate and soil properties*. Geophysical Research Letters, 33: L18401.
- NORRIS, J.E. (2005). *Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England*. Plant and Soil 278:43-53.

PRETI, F., DANI, A., LAIO, F. (2010). *Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes*. Ecol. Eng. pp 36, 305–316.

RUIZ DE LA TORRE, J. (1990). (ed) *Catálogo de especies vegetales a utilizar en plantaciones de carreteras*. Madrid. MOPU.

S. DE BAETS & J. POESEN & B. REUBENS & K. WEMANS & J. DE BAERDEMAEKER & B. MUYS. (2008). *Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength*. Plant Soil. 305. pp 207–226.

SCHWARZ, M., COHEN, D., OR, D., 2010. Root–soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles. J. Geophys. Res. 115 doi: [http://dx.doi.org/ 10.1029/2009JF001603](http://dx.doi.org/10.1029/2009JF001603) F04035.

TUTIN, T.G. et al. (1964-1980) (eds.) *Flora Europaea*. 5 vol. Cambridge University Press, Cambridge.

TARDÍO, G., GONZÁLEZ-OLLAURI, A., MICKOVSKI, S. B., (2016). *A non-invasive preferential root distribution analysis methodology from a slope stability approach*. J. Ecol. Eng. 97, 46–57.

TARDIO, G., MICKOVSKI, S.B. (2015). *Method for synchronisation of soil and root behaviour for assessment of stability of vegetated slopes*. J. Ecol. Eng. 82,222–230, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.101>.

WALDRON, L.J. (1977). *The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil*. J. Soil Sci. Soc. Am. 41, 843–849.

WU, H., MCKINNELL, W., SWANSTON, D. (1979). *Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island*. Alaska. Can. Geotech. J. 16 (1), 19–33.

10.2.2 Apartado 5.4 Metodología de cálculo y justificación de soluciones

BRANDL, H. (1987). *“Konstruktive Hangsicherungen, Sonderdruck aus dem Grundbautaschenbuch” Dritte Auflage, Teil 3*. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, pp. 357–375.

FERNANDES, J.P., GUIOMAR, N. (2016). *Simulating the stabilization effect of soil bioengineering interventions in Mediterranean environments using limit equilibrium stability models and combinations of plant species*. Ecological Engineering 88, pp122–142.

GREENWOOD, J.R. (2006). *SLIP4EX – A program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation, reinforcement, and hydrological changes*. Geotechnical and Geological Engineering 24: pp 449-465.

JOHANSEN, K.W. (1949). *Theory of timber connections*. International Association of Bridge and Structural Engineering. Publication N°9 pp 249-262. Bern.

MENEGAZZI, G, PALMERI, E. (2013). *Il dimensionamento delle opere di Ingegneria Naturalistica*. Direzione Infrastrutture, Ambiente e Politiche Abitative. Regione Lazio.

TARDÍO, G., MICKOVSKI, S. B. (2016). *Implementation of eco-engineering design into existing slope stability design practices*. J. Ecol. Eng. 92, 138–147.

TARDÍO, G., MICKOVSKI, S.B., SANGALLI, P. (2019). *Incorporating the particularities of soil and water bioengineering works into a design methodology with monitoring feedback loops*. Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovation, Mechanics and Applications-Zingoni. (Ed.). Taylor & Francis Group. London, ISBN 978-1-138-38696-9. pp 2376-2381.

TARDÍO, G.; MICKOVSKI, S.B. (2023). *A Novel Integrated Design Methodology for Nature-Based Solutions and Soil and Water Bioengineering Interventions: The Tardio&Mickovski Methodology*. Sustainability 2023, 15, 3044. <https://doi.org/10.3390/su15043044>. Artículo descargable desde: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3044>.

TAYLOR, D.W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. Wiley.

10.2.3 Apartado 6.1 Técnicas de recubrimiento

HERRI LAN -*Hidrosiembras o siembras en húmedo tipo H1*. Diputación Foral de Bizkaia.

HERRI LAN -*Hidrosiembras o siembras en húmedo tipo H2*. Diputación Foral de Bizkaia.

POCH, R. M. (1993). *Tècniques de conservació dels sòls*. Lleida: Universidad de Lleida.

SEMILLAS FITÓ, S.A.U. (2013). *Áreas verdes, césped profesional 2013-2014*.

THOMAS, R.; CHEVIGNY, Y. (1990). *L'encyclopédie des gazons*. Société Française des Gazons. Éd. S.E.P.S., Boulogne.

10.2.4 Apartado 6.2 Técnicas de estabilización-6.2.2 fajina

DIDIER, M., EVETTE, A., SCHMITT, E., LEBLOIS, S., JAYMOND, D., EVETTE, J-B., MIRA, E., RAYMOND, P., FROS-SARD, P-A & VIVIER, A. (2023). *Les fascines de ligneux en génie végétal. Guide technique par l'Office Français de la Biodiversité avec l'Institut National de Recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement*. 74 pages.

10.2.5 Apartado 6.3 Técnicas mixtas. 6.3.9 escollera vegetada

MITECO. (2006). *Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera*. Ministerio de Fomento.

10.2.6 Apartado 6.4 Cálculos entramados de madera

ACHARYA, M.D. (2017). *Analytical approach to design vegetative crib walls*. Geotech Geol Eng (2018) 36:483–496 <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0342-5>.

ARGÜELLES ÁLVAREZ, R., ARRIAGA MARTITEGUI, F, MARTÍNEZ CALLEJA, J.J. (2000). *Estructuras de madera: diseño y cálculo*. AITIM. ISBN: 84-87381-17-1.

NATURALEA-S. L. *Cálculo de la estructura Loricata*.

