



www.aeip.org.es

MANUAL TEÓRICO-PRÁCTICO DE CÁLCULO, DIMENSIONADO Y JUSTIFICACIÓN EN EL CORTO Y EL LARGO PLAZO DE LAS OBRAS DE BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE.

LA METODOLOGÍA TARDÍO&MICKOVSKI

Incluye ejercicios y ejemplos prácticos de casos y obras reales

Autor: Guillermo Tardío.

Dr. Ingeniero de montes (PhD). AEIP (Asociación Española de Bioingeniería del Paisaje)

Cómo citar este manual:

Tardío, G. Manual teórico-práctico de cálculo, dimensionado y justificación en el corto y el largo plazo de las obras de bioingeniería del paisaje. La metodología Tardío&Mickovski. 2024. Asociación Española de Bioingeniería del Paisaje (AEIP). DOI: 10.13140/RG.2.2.31713.11360

Asociación Española de Bioingeniería del Paisaje (AEIP). www.aeip.org.es

Este manual se basa en las siguientes publicaciones:

Tardío, G., Mickovski, SB. 2023. A Novel Integrated Design Methodology for Nature-Based Solutions and Soil and Water Bioengineering Interventions: The Tardío&Mickovski Methodology. *Sustainability* 2023, 15, 3044. <https://doi.org/10.3390/su15043044>. Descargable en:

<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3044>

Castillo-Serrabasa, J. *Avaluació Funcional i Estructural Dels Entramats en Ambients Fluvials*. Treball de Final de Máster. Master D'ecologia, Gestió i Restauració del Medi Natural; Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona:Barcelona, Spain, 2022.

Sorolla, A.; Piera, E.; Mota Freixas, B.; Sorolla Salvans, G.; Rueda, I.; Lochner Prats, A.; Unzeta, C. Improvement of the Plantation Success in a CribWall in a Mediterranean Hydro-Meteorological Risks Scenario—Practical Results. *Sustainability* **2021**, *13*, 11785. <https://doi.org/10.3390/su132111785>

Tardío, G., 2021. Nueva metodología de diseño y cálculo de las obras de bioingeniería. *Revista Montes* Nº 145. Tercer trimestre 2021. Pp. 16-21.

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., 2016. Implementation of eco-engineering design into existing slope stability design practices. *J. Ecol. Eng.* 92, 138–147.

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.

Menegazzi, G., & Palmeri, F., 2013. Il dimensionamento delle opere di Ingegneria Naturalistica. Direzione Infrastrutture, Ambiente e Politiche Abitative. Regione Lazio. Descargable en <https://www.aipin.it/pubblicazioni/>

Hojas Excel para cálculo de obras de bioingeniería del paisaje. Publicaciones de la AIPIN (Asociación Italiana de Bioingeniería del Paisaje). Descargables en <https://www.aipin.it/pubblicazioni/>

Contenido

1.	Introducción. La componente temporal de las obras de bioingeniería	5
2.	Metodología de cálculo y justificación de las soluciones.....	6
2.1.	Introducción	6
2.2.	Mecanismos de refuerzo de las técnicas	7
2.3.	Las comprobaciones de estabilidad de las obras de bioingeniería.....	7
2.4.	Procesos de deterioro de la madera	8
2.5.	Fases e hitos temporales de la metodología Tardío & Mickovski.....	12
3.	Estabilidad de las laderas vegetadas: el papel de la vegetación.....	19
3.1.	Introducción	19
3.2.	Efectos del desarrollo de la vegetación en las comprobaciones de estabilidad.....	20
4.	Conclusiones.....	24
5.	Casos y ejemplos prácticos de aplicación (casos reales).....	25
5.1.	Expresiones básicas de estabilidad interna.....	25
5.1.1	Comprobación a flexión	27
5.1.2.	Comprobación a cortante	27
5.1.	EJEMPLO PRÁCTICO 1.....	28
5.1.1.	Datos de partida.....	28
5.1.2.	Comprobaciones de la FASE 1	29
5.1.3.	Análisis de los procesos de deterioro de la madera en el caso del ejemplo propuesto.	30
5.1.4.	Comprobaciones de la FASE 2.....	31
5.1.5.	Comprobaciones de la FASE 3.....	33
5.1.6.	Conclusiones caso práctico 1	37
5.2.	EJEMPLO PRÁCTICO 2.....	37
5.2.1.	Datos de partida.....	38
5.2.2.	Comprobaciones de la FASE 1	38

5.2.3.	Análisis de los procesos de deterioro de la madera en el caso del ejemplo propuesto	39
5.2.4.	Comprobaciones de la FASE 2	40
5.2.5.	Comprobaciones de la FASE 3	42
5.2.6.	Conclusiones caso práctico 2	44
6.	Bibliografía	45
7.	Agradecimientos	47

1. Introducción. La componente temporal de las obras de bioingeniería

La bioingeniería del paisaje 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 (Schiechtl, 1980). La bioingeniería fluvial y del suelo son herramientas sostenibles para mejorar la resiliencia contra la pérdida y degradación del suelo (Schiechtl & 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 inertes utilizados suelen ser biodegradables (madera, troncos, mantas orgánicas, mallas orgánicas, biorrollos, etc.) por 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&Mickovski, 2016; Tardío *et al.*, 2018). Por tanto, incorporar y reflejar la componente temporal en el análisis y diseño de una obra de bioingeniería del paisaje 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), metodología 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:

- Definir una estructura temporal de hitos/fases de cálculo y comprobaciones de la obra de bioingeniería para el análisis a corto y largo plazo.
- Calcular e incorporar el avance y los efectos de los procesos de deterioro de la madera en las comprobaciones de estabilidad y resistencia mecánica en el largo plazo.
- Incorporar los efectos de refuerzo y estabilización de los sistemas radicales de la vegetación en desarrollo.

- Integrar y articular los anteriores procesos en el diseño y cálculo a corto y largo plazo de las obras de bioingeniería del paisaje mediante una metodología cuyos resultados están del lado de la seguridad. La metodología ofrece un diseño de la obra del lado de la seguridad.

2. Metodología de cálculo y justificación de las soluciones

2.1. 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. En la vida de servicio de una obra de bioingeniería se pueden distinguir tres etapas principales. 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 las funciones de estabilización y refuerzo de la zona de intervención. Los materiales/estructuras 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, desde un punto de vista estructural, el principal objetivo del diseño de este tipo de actuaciones es asegurar la rigidez y estabilidad necesaria que permita el proceso de trasvase del papel estabilizador entre los materiales inertes y el material vivo. De esta manera se da viabilidad al adecuado desarrollo y evolución de la vida de servicio de la obra de bioingeniería del paisaje.

2.2. Mecanismos de refuerzo de las técnicas

En general, existen dos tipos de mecanismos de refuerzo de las laderas. El primer tipo son los elementos de refuerzo externo que están representados por elementos de contención (muros, entramados, escolleras, gaviones, etc.). El segundo tipo son los elementos de refuerzo interno que están representados por los distintos tipos de tierra reforzada (con geotéxtil, geomallas, telas metálicas, etc.). En el primer caso, las fuerzas estabilizantes se movilizan sobre una estructura externa. En el segundo caso, 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). Para el primer tipo, 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 and Sotir, 1996). Para el segundo tipo se utiliza la teoría de diseño y cálculo de tierras mecánicamente estabilizadas. En ambos casos, el refuerzo se debe a las propiedades y configuración de los materiales empleados.

Aparte de los anteriores procesos, en la obra de bioingeniería podemos contar con otro mecanismo de refuerzo relacionado con el material vivo utilizado. Éste 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 3 Estabilidad de las laderas vegetadas: el papel de la vegetación*.

Por otro lado, en el largo plazo, han de incluirse los procesos de deterioro de la madera de acuerdo a lo indicado en el epígrafe 2.4 del presente manual.

Por último, la incorporación de los distintos procesos de deterioro y los mecanismos de refuerzo en el dimensionado y comprobación de una obra de bioingeniería se indican en el epígrafe *2.5 Fases e hitos temporales de la metodología Tardío&Mickovski*.

2.3. Las comprobaciones de estabilidad de las obras de bioingeniería

En general, 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 es particular para 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 global 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. 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 se han de tener en cuenta los procesos de deterioro de los materiales utilizados.

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 de bioingeniería. 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 de acuerdo a la teoría de mecánica de suelos.

En cualquier caso, será necesario definir y dimensionar las obras y los elementos utilizados de forma que las comprobaciones de estabilidad se cumplan durante un periodo de tiempo que permita que la vegetación se desarrolle. Es decir, las comprobaciones de la FASE 1 y 2 han de asegurar el desarrollo adecuado y eficiente de la vegetación hasta alcanzar las condiciones de la FASE 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.

En los siguientes epígrafes se analizan los factores con mayor influencia en la evolución temporal y diseño de las obras de bioingeniería: el deterioro de los materiales biodegradables utilizados (se analiza el caso de la madera) y el desarrollo y efectos de refuerzo del material vegetal vivo utilizado.

2.4. 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 (Fig. 1) 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.

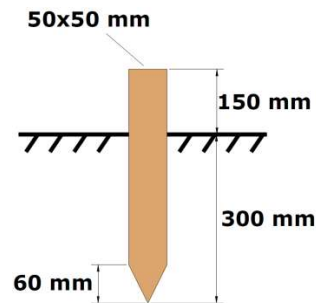


Figura 1. Dimensiones de estacas utilizadas en experimentos para analizar los procesos de deterioro y pudrición de la madera en contacto directo con el suelo (adaptado de Leicester *et al.*, 2003)

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). 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 (Ec.1):

$$r = k_{MADERA} \cdot k_{CLIMA} \text{ (Ec. 1)}$$

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 media anual 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 madera 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 valores del coeficiente K_{MADERA} en función del tipo de madera y su durabilidad:

Valores para madera tipo duramen:

Especies muy durables (tipo 1). $K_{\text{MADERA}} = 0,23$

Especies durables (tipo 2). $K_{\text{MADERA}} = 0,48$

Especies medianamente durables (tipo 3). $K_{\text{MADERA}} = 0,76$

Especies menos durables (tipo 4). $K_{\text{MADERA}} = 1,36$

Valores para madera de albura:

Madera de frondosas. $K_{\text{MADERA}} = 2,72$

Madera de coníferas. $K_{\text{MADERA}} = 5,44$

Valores para madera juvenil (se calcula en función del valor del coeficiente para la madera tipo duramen)

$K_{\text{MADERA}}(\text{tipo juvenil}) = 2 * K_{\text{MADERA}}(\text{tipo duramen})$ (Ec.2)

A continuación, se incluyen las expresiones de los coeficientes para el cálculo de K_{CLIMA} en función de la climatología de la zona de actuación:

$$K_{\text{CLIMA}} = f(P_{\text{MEDIA}})^{0.3} \cdot g(T_{\text{MEDIA}})^{0.2} \quad (\text{Ec.3})$$

Casuística para $f(P_{\text{MEDIA}})$:

Si $P_{\text{MEDIA}} \leq 250$ mm o $N_d \geq 6$ meses; $f(P_{\text{MEDIA}}) = 0$ (Ec 3.1)

Si $P_{\text{MEDIA}} > 250$ mm y $0 \leq N_d < 6$ meses; $f(P_{\text{MEDIA}}) = 10 \cdot \left[1 - e^{-0.001 \cdot (P_{\text{MEDIA}} - 250)} \right] \cdot \left(1 - \frac{N_d}{6} \right)$ (Ec 3.2)

Casos para el cálculo de $g(T_{\text{MEDIA}})$:

Si $T_{\text{MEDIA}} \leq 5^\circ\text{C}$; $g(T_{\text{MEDIA}}) = 0$ (Ec 3.3)

Si $5 < T_{\text{MEDIA}} \leq 20^\circ\text{C}$; $g(T_{\text{MEDIA}}) = -1 + 0.2 \cdot T_{\text{MEDIA}}$ (Ec 3.4)

$$\text{Si } T_{\text{MEDIA}} > 20^\circ \text{ C; } g(T_{\text{MEDIA}}) = -25 + 1.4 \cdot T_{\text{MEDIA}} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde:

P_{MEDIA} = precipitación anual media de la zona de intervención (mm)

T_{MEDIA} = temperatura media anual de la zona de intervención ($^\circ\text{C}$)

N_d = número anual de meses secos (obtenido a partir de climodiagrama)

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):

$$t_0 = 5.5 \cdot r^{-0.95} \quad (\text{Ec. 4})$$

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.

$$d_t = r \cdot (t - t_0) \quad (\text{Ec.5})$$

d_t = 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 $2d_t$ (ver Figura 2).

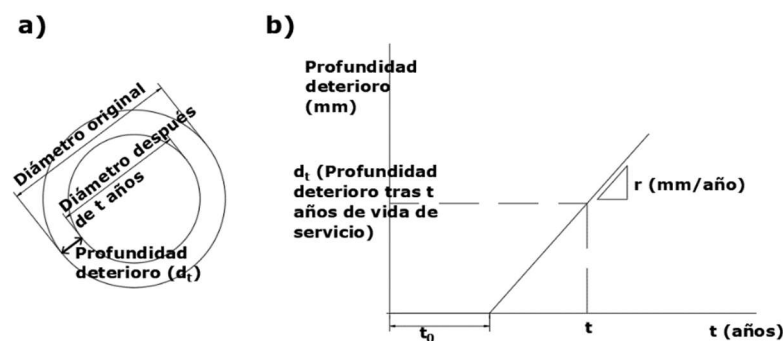


Figura 2. a) Cambios en el diámetro y profundidad de deterioro (d_t); b) avance de los procesos de deterioro mostrando el significado de las variables del modelo (adaptado de Tardío & Mickovski, 2016)

A partir del valor de d_t se puede obtener el módulo resistente residual (W_R) de la pieza de madera (caso de sección circular):

$$W_R = \frac{\pi}{32} (D - 2d_t)^3 \quad (\text{Ec.6})$$

Donde W_R 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 en 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.

Este método también permite obtener el momento en el que la estructura, tras una pérdida paulatina y acumulada de su sección, llega a su estado límite último. Es decir, el momento en el que la estructura sólo podrá desarrollar funciones estructurales residuales y será incapaz por sí sola de estabilizar la zona de actuación. Básicamente, esto se realiza hallando el diámetro para el cual se alcanza dicha situación y calcular, a partir de él, el tiempo (número de años) que ha de pasar para llegar a dicha reducción del diámetro original de los elementos de madera. Estos cálculos se muestran en los ejercicios y casos prácticos incluidos en el presente manual.

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 del efecto de refuerzo del material vivo utilizado.

Tal y como se desarrollará en otros capítulos del este manual, el refuerzo debido a la vegetación se podrá estimar a partir de los distintos métodos disponibles (p.ej., Waldron, 1977; Wu *et al.*, 1979; Gray & Leiser, 1982; Schwarz *et al.*, 2010; Tardío & Mickovski, 2015). Una explicación de este tipo de modelos se puede encontrar en Norris *et al.* (2008).

2.5. Fases e hitos temporales de la metodología Tardío & Mickovski

Como ya se ha comentado, 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; TARDÍO & MICKOVSKI, 2016; 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, por si solos, 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 (Fig. 3).



Figura 3. Troncos de un entramado vivo de madera en fase de descomposición muy avanzada (río Artía, Irún). Las raíces de la vegetación se desarrollan en el espacio anteriormente ocupado por los troncos y absorben sus nutrientes. Foto: Guillermo Tardío.

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 en desarrollo. También se han de definir, desde el punto de vista del diseño y el cálculo de la obra, los elementos principales a tener en cuenta en las anteriores fases. Es decir, el anterior esquema de FASES se ha de adaptar a las necesidades de definición de una metodología de diseño de las obras de bioingeniería.

Se propone el siguiente esquema de redefinición de fases e hitos temporales (Tardío & Mickovski, 2023) para asegurar el correcto trasvase de las funciones estabilizadoras a lo largo de la vida de servicio de la obra de bioingeniería del paisaje:

FASE 1: Momento 0. Momento justo después de la finalización de las obras. Se comprueban las estructuras de la obra de bioingeniería sin incluir efectos de refuerzo 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 tienen el objetivo de asegurar un marco temporal mínimo de estabilidad estructural de la zona de actuación. Esto, a su vez, permitirá el buen desarrollo de la vegetación y, por tanto, la

viabilidad de los procesos de trasvase de las funciones estabilizadoras entre la estructura y la vegetación.

En esta fase, la variación de las secciones de los elementos de madera se realizará según el método de Leicester *et al.* (2003) y Tardío & Mickovski (2016; 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. A nivel preliminar, para el tipo de material vivo empleado en las obras de bioingeniería (estacas vivas, ramas vivas, plantaciones arbóreas y arbustivas), 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 (Fernandes & Guiomar, 2016; Zaimas *et al.*, 2019; Bischetti *et al.*, 2021, Sorolla *et al.*, 2021)

FASE 3: Esta fase corresponde al momento en el que la vegetación es el elemento principal de refuerzo y estabilización en la zona de intervención. En esta fase, tal y como se explicará más adelante, 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)

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

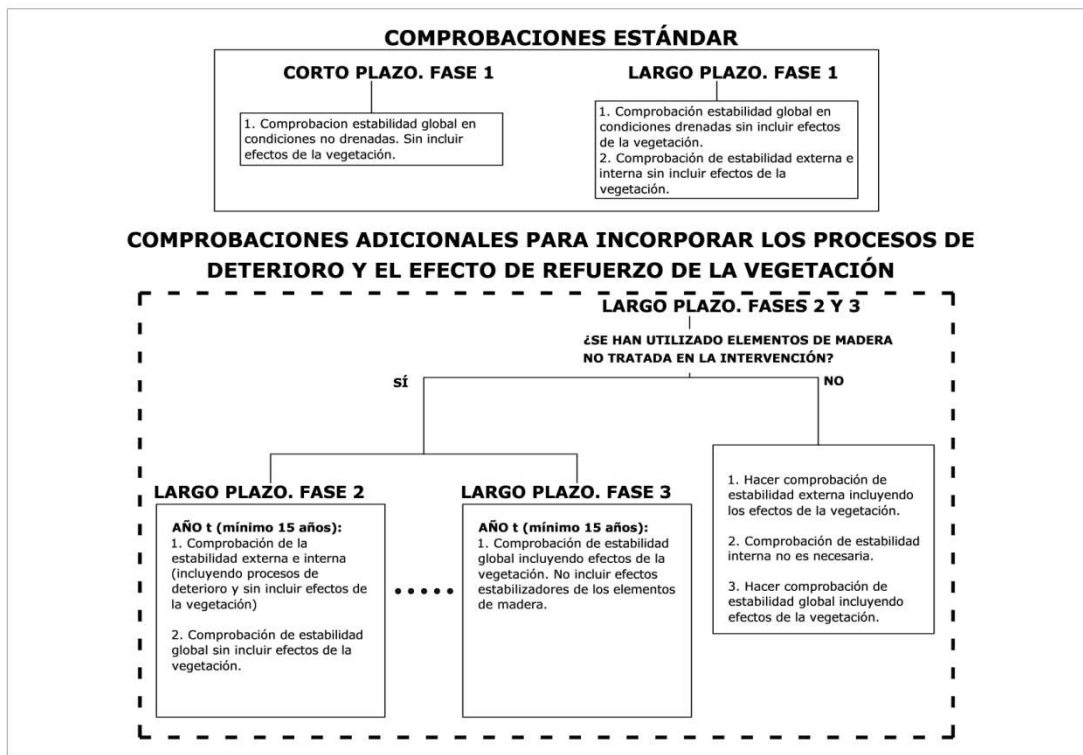


Figura 4. Metodología Tardío & Mickovski. Metodología de diseño de las obras de bioingeniería incluyendo procesos de deterioro de los materiales y efectos de refuerzo de la vegetación. En el ejemplo de la figura se ha definido un hito temporal en $t = 15$ años (como valor mínimo) y se comprueba que el sistema es estable en cada una de las fases.

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

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.

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). No se tienen en cuenta los efectos de refuerzo de la vegetación.
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. En esta fase, aunque ya existen efectos de refuerzo de la vegetación, no se tienen en cuenta en las comprobaciones de estabilidad de la obra de bioingeniería.
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. En esta fase, no se tienen en cuenta los efectos estabilizadores, residuales o no, de las estructuras de madera utilizadas.

Con las anteriores comprobaciones e hitos temporales mínimos se asegura lo siguiente:

- En la FASE 1 se asegura la estabilidad de la zona de actuación a partir de los materiales inertes utilizados en la obra de bioingeniería.
- 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 dentro de 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 el momento en el que se alcanza la resistencia última de la estructura (ver ejemplos y casos de estudio)

Conviene señalar que, aun cuando no se tengan en cuenta los efectos de refuerzo de la vegetación, estos estarán ya presentes en esta FASE. Por tanto, es en esta FASE donde se alcanzará el valor real más alto de los factores de seguridad de la obra ya que la estructura será todavía estable y, a la vez, el suelo estará reforzado por las raíces de la vegetación. A medida que la estructura vaya deteriorándose hasta alcanzar su valor estructural residual, el efecto del solape entre ambos tipos de refuerzo (estructura + vegetación) irá disminuyendo y con él, el valor de los factores de estabilidad de la obra. Los resultados de la metodología están, por tanto, del lado de la seguridad.

- 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). Es precisamente el hecho de hacer coincidir el hito temporal de comprobación de las FASES 2 y 3 lo que asegura el trasvase completo de los efectos de refuerzo y estabilización entre la estructura y la vegetación en desarrollo.

Como ya se ha comentado, el hito temporal propuesto para las comprobaciones de las FASES 2 y 3 no es arbitrario y se basa en las experiencias acumuladas en trabajos de investigación y en trabajos de seguimiento de obras de bioingeniería. En cualquier caso, el técnico puede definir un hito temporal distinto (siempre superior al valor mínimo planteado de 15 años; por ejemplo $t = 20$ años). En este aspecto la aplicación de la metodología es flexible y la aplicación práctica de dichos cambios es directa. En cualquier caso, el asegurar un adecuado comportamiento mecánico de la estructura durante los primeros 15 años de su vida de servicio asegurará tanto el trasvase de las funciones estabilizadoras entre la estructura y la vegetación como la existencia de un periodo de solape entre los efectos de refuerzo.

De acuerdo al enfoque planteado, en la siguiente gráfica se muestra de forma esquemática la evolución del nivel de seguridad de la obra (en todos los casos, dicho nivel de seguridad estará por encima del umbral definido como mínimo necesario en el diseño de la actuación)

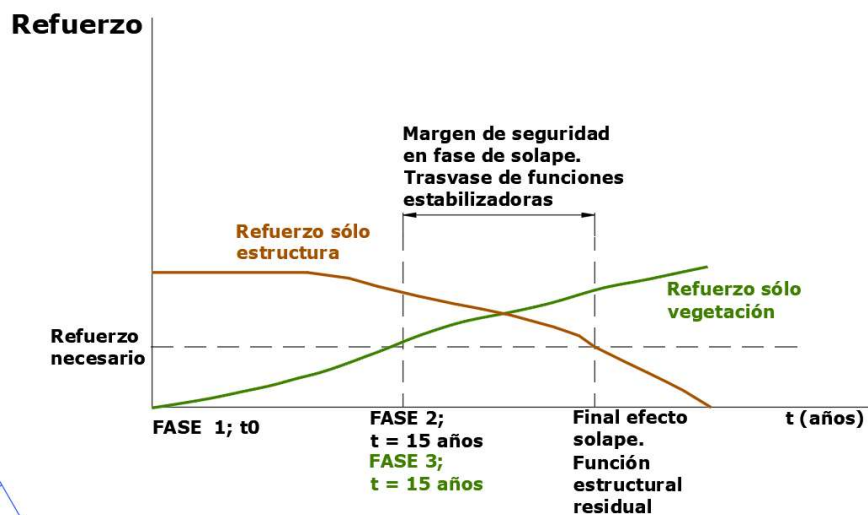


Figura 5. Gráfica refuerzo-elementos-solape. Se puede observar la evolución de los efectos de refuerzo de la estructura y de la vegetación. Así mismo, se puede observar el margen temporal de seguridad en los procesos de tránsito de las funciones estabilizadoras entre la estructura y la vegetación.

Del análisis de la anterior figura se puede concluir lo siguiente;

Durante la fase de solape se alcanza el valor máximo del Factor de Seguridad (coincide con el valor máximo de refuerzo). El periodo de tiempo en el que existe solape entre las funciones estabilizadoras de la estructura y la vegetación en desarrollo termina en el momento en el que la estructura alcanza su estado límite último. El intervalo de tiempo entre el hito temporal de la FASE 2 y el momento en el que la estructura alcanza su estado límite último, representa un margen temporal de seguridad en el que se asegura el solape efectivo de las funciones de estabilización y el buen desarrollo de las funciones de refuerzo del material vivo utilizado en la obra.

En los ejercicios prácticos se estudiará con casos reales la anterior situación, analizando los márgenes de seguridad conseguidos con la aplicación de la metodología Tardío&Mickovski.

Con el anterior enfoque, 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.

A continuación, se incluyen algunas recomendaciones relativas a la aplicación de la metodología Tardío&Mickovski:

- Los aspectos más importantes consisten en la comprobación de la estabilidad de la obra en la FASE 1 y la comprobación de estabilidad interna de la estructura en el hito temporal de la FASE 2.

- Otro aspecto importante consiste en determinar el momento en el que la estructura alcanza su estado límite último. Lo anterior permite determinar el margen temporal de seguridad en el que se asegura el correcto trasvase de las funciones estabilizadoras entre la estructura y la vegetación en desarrollo.
- La principal limitación de la FASE 3 se centra en la escasa disponibilidad de información de la morfología y propiedades mecánicas de los sistemas radicales de la vegetación en los hitos temporales de cálculo (por ejemplo, 15 años, 20 años, etc.). De ahí la importancia de determinar el margen temporal de seguridad descrito en el anterior párrafo. Por tanto, más que la determinación de los efectos de refuerzo de la vegetación a lo largo de la FASE 3, la metodología se centra en asegurar el correcto trasvase de las funciones estabilizadoras a lo largo de la vida de servicio de la obra de bioingeniería del paisaje.
- Desde la AEIP, estamos elaborando un manual en el que se recoge información de los sistemas radicales de las especies vegetales más utilizadas en las obras de bioingeniería (tanto en ámbito mediterráneo como atlántico)

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 (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.

Por otro lado, la profundidad del aparato radical (dato necesario para la estimación del refuerzo debido a la vegetación en la FASE 3) 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; TRON *et al.*, 2014; 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 el epígrafe 3.2 del presente manual.

Cabe señalar que las comprobaciones de estabilidad interna y externa se pueden realizar según Menegazzi&Palmeri (2013) así como de sus hojas Excel (descargables en: <https://www.aipin.it/publicazioni/>). Las comprobaciones de estabilidad 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) y que apoyen y aseguren un adecuado desarrollo del material vegetal vivo utilizado. La información

recogida (Fig. 6), 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 en ZAIMES *et al.* (2019).



Figura 6. Análisis, mediante resistógrafo, del estado de deterioro de los troncos utilizados en un entramado de madera en el río Artía (Irún, Guipúzcoa). Foto: Guillermo Tardío

3. Estabilidad de las laderas vegetadas: el papel de la vegetación

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. Aun cuando la vegetación puede ser, en ocasiones, origen de efectos negativos como, por ejemplo:

- generación de sobrecargas situadas en zonas que no favorecen la estabilidad del talud,
- efectos del viento transmitido al suelo a través de las copas y los troncos de la vegetación,
- aparición de zonas de flujo preferencial en el interior del terreno,

A pesar de lo anterior, el efecto neto de la vegetación es, en general, claramente positivo.

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

3.2. Efectos del desarrollo de la vegetación en las comprobaciones de estabilidad

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 (i.e. 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). Este modelo supone que, cuando un suelo vegetado es sometido a fuerzas cortantes, todas las raíces son sometidas a tracción (dentro de la banda de cortante). También supone que, antes de la rotura del suelo vegetado, todas las raíces alcanzan a la vez su máxima resistencia a tracción antes de producirse el deslizamiento o fallo de la ladera. Las anteriores hipótesis dan lugar a una sobrestimación del efecto de refuerzo calculado.

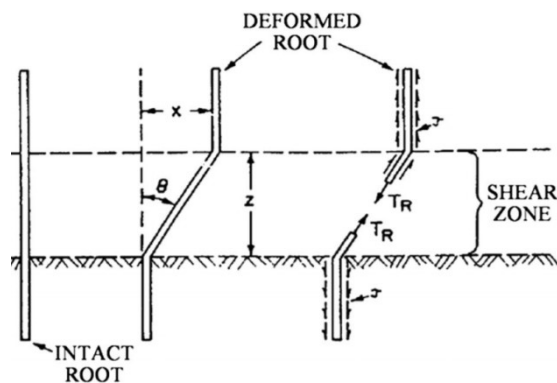


Figura 7. Detalle del modelo de Wu et al (1979) y Waldron (1977), Fuente: Norris et al. (2008)

Como se ha comentado, el efecto de refuerzo de las raíces se traduce en un valor de cohesión adicional (que se suma al correspondiente del suelo sin vegetación). Es decir, se mejoran las propiedades resistentes del terreno a través del incremento del valor de la cohesión del suelo.

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

$$\Delta c = 0.5 \cdot 1.1 \cdot t_R \quad (\text{Ec.7})$$

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. Se trata de un valor medio del factor de corrección propuesto en distintas publicaciones científicas.

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)

$$t_R = \sum_{i=1}^{i=n} T_{Ri} RAR_i(z) = T_R \cdot RAR(z) \quad (\text{Ec.8})$$

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). Es un indicador de la densidad de raíces presente a una determinada profundidad.

$$RAR(z) = \frac{Ar(z)}{Ars(z)} \quad (\text{Ec.9})$$

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)

Como se puede observar, los parámetros principales del modelo se basan en el conocimiento de la variación de la densidad de las raíces con la profundidad y el valor de la resistencia a tracción de las raíces.

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; Preti et al., 2022):

$$Ar(z) = Ar_0 e^{\frac{-z}{b_m}} \quad (\text{Ec.10})$$

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 la profundidad del centro de masas de la distribución teórica de las raíces (ver TABLA 2 para su estimación)

El único dato a obtener en campo o en viveros es la sección transversal a la altura del cuello de la raíz y el área del suelo explorada por las raíces en las zonas cercanas a la superficie. A partir de este último dato y, utilizando la profundidad máxima del sistema radical, se puede interpolar la variación del suelo explorado utilizando los modelos teóricos de distribución de las raíces (ver TABLA 2). Con este último dato se puede obtener, a cualquier profundidad, el valor de $RAR(z)$.

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 teórica de las raíces (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 entre sí a través de las siguientes expresiones:

- Para una distribución teórica cónica del sistema radical:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V}{\pi \cdot h}} \quad (\text{Ec.11})$$

- Para una distribución teórica cilíndrica del sistema radical:

$$R = \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot h}} \text{ (Ec.12)}$$

- Para una distribución teórica semiesférica del sistema radical:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V}{2 \cdot \pi}} \text{ (Ec.13)}$$

Donde:

R: radio de la superficie circular del suelo explorada en la zona cercana a la superficie (m)

V: volumen del sistema radical (m³)


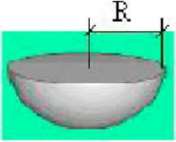
h: profundidad máxima del sistema radical (m)


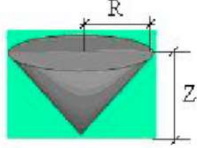

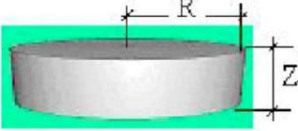
Como se puede observar, se trata de problemas en los que, a partir de las variables conocidas, se puede inferir el valor de la variable incógnita. El valor de R se puede estimar también a partir de otras relaciones alométricas (por ejemplo, relación diámetro de copa - diámetro sistema radical; relación diámetro a la altura de cuello (DBH) - diámetro sistema radical, etc.)

A partir de R se obtendría el valor del círculo de superficie explorada por las raíces en la zona cercana a la superficie (z= 0 m) la cual permitiría obtener el valor del $A_{rs}(z)$ a cualquier profundidad (ver TABLA 2)

La variación con la profundidad del área de suelo explorado por las raíces ($A_{rs}(z)$) se puede estimar en función del tipo de sistema radical de la especie vegetal analizada (ver TABLA 2).

TABLA 2. Distribución del volumen explorado por las raíces en función de las diferentes tipologías de sistemas radicales (adaptado de Cornolini *et al.*, 2008)

Tipo de sistema radical	Morfología	Geometría simplificada	$A_{rs}(z)$	Profundidad del centro de masas (profundidad media)
Esférico			$4 \cdot (R^2 - z^2)$	$(3/8) \cdot R$

Pivotante (cónico)			$4*(R-z)^2$	$Z/3$
Cilíndrico			$4*R^2$	$Z/2$

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.

En el caso de haber obtenido el valor de refuerzo (el valor de cohesión adicional) de distintas especies vegetales utilizadas en la obra de bioingeniería, se podría obtener un valor medio (a la profundidad escogida) de los valores de cohesión adicional obtenidos mediante nuestros modelos de refuerzo de suelo-raíces.

El anterior enfoque, si el objetivo es maximizar el efecto de refuerzo del suelo, nos permitirá seleccionar las especies a utilizar aunque hay que tener en cuenta que existen otras funciones que nos interesa conseguir (por ejemplo, la función polinizadora de las especies vegetales seleccionadas, la producción de frutos carnosos, etc.). En general, nos interesará conseguir la multifuncionalidad ofrecida por la vegetación. Así, queremos tener algunas especies que desarrollen un buen aparato radical, otras que ofrezcan alimento a la fauna vertebrada e invertebrada presente en el ámbito de estudio (por ejemplo, apoyo a polinizadores, especies que produzcan frutos carnosos, refugio, etc.). Eso es especialmente relevante en el caso de querer apoyar a grupos de fauna de interés presentes en el ámbito de actuación.

4. Conclusiones

Con la metodología Tardío&Mickovski permite:

- Utilizar un proceso de cálculo que refleja las particularidades de las obras de bioingeniería del paisaje. Se refleja de una forma realista la vida de servicio de la obra de bioingeniería.
- Estimar el avance de los procesos de deterioro de los troncos de madera e incorporarlos en el dimensionado de las estructuras.
- Determinar el margen temporal de seguridad que asegura el correcto trasvase de las funciones estabilizadoras entre los elementos inertes y el material vivo utilizado en la obra.
- Estimar de forma aproximada los efectos de refuerzo de la vegetación. La metodología permite reflejar la evolución del papel estabilizador de la vegetación.

La metodología Tardío & Mickovski permite detectar, anticipar y solucionar momentos críticos durante la vida de servicio de la obra de bioingeniería (ver la resolución de los casos prácticos). Esta capacidad es especialmente relevante en este tipo de obras ya que el principal objetivo consiste en asegurar el correcto desarrollo del vegetal vivo utilizado, así como de sus funciones de refuerzo y estabilización.

La metodología propuesta posibilita la generación de procesos de mejora continua, la calibración del método y la utilización de la información generada durante la fase de seguimiento de la obra.

5. Casos y ejemplos prácticos de aplicación (casos reales)

5.1. Expresiones básicas de estabilidad interna

Se incluye en este epígrafe una explicación de las fórmulas y expresiones a tener en cuenta a la hora de realizar los cálculos de estabilidad interna del entramado de madera.

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)

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). La aplicación de los coeficientes afectará tanto a las propiedades resistentes y mecánicas de los materiales utilizados como a las del terreno (cohesión, ángulo de fricción interna, etc.)

A la hora de determinar los esfuerzos a los que están sometidos los elementos de un entramado, se simula el larguero (ver notación de los elementos de un entramado en la Figura 8) como una viga biapoyada sometida a una carga uniformemente repartida.

La notación seguida en los elementos del entramado es la siguiente:

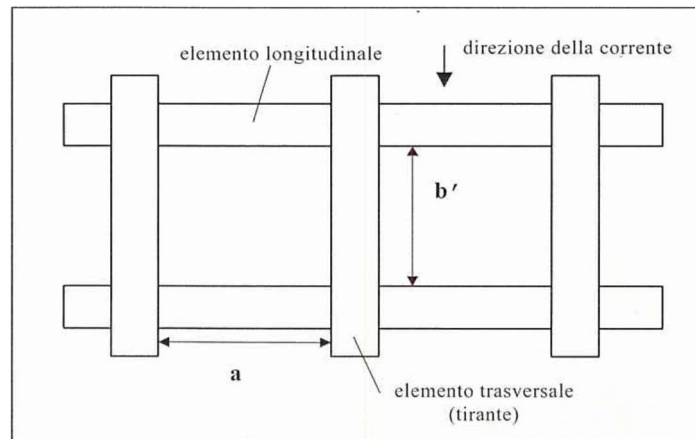


Figura 8. Notación de los elementos de un entramado de madera (adaptado de Menegazzi y Palmeri, 2013). Larguero = elemento longitudinal; travesaño = elemento transversal.

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 a la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{M}{W_R} \quad \text{Ec. 14}$$

Con:

$$W_R = \frac{\pi \cdot D^3}{32} \quad \text{Ec. 15}$$

$$M = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

M = momento de diseño (kNm)

W_R = módulo resistente de una sección circular (m^3)

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)

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); $\gamma_M = 1,3$ (coeficiente de minoración de la resistencia característica de la madera).

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:

$$p_H = K_a \cdot p_V = K_a \cdot \gamma \cdot H \quad \text{Ec.17}$$

$$q = p_H \cdot 2 \cdot D \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

K_a = 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.

5.1.1 Comprobación a flexión

Utilizando las Ec. 17 y Ec. 18 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 Ec. 14, Ec. 15 y Ec. 16. 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. 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.

5.1.2. Comprobación a cortante

Respecto al cortante, en los apoyos extremos se obtiene un cortante de $0,375 \cdot q \cdot l$, mientras que en la zona central tendremos un cortante (V_d) de $0,625 \cdot q \cdot l$ con la sección completa. Esta última sección es la más desfavorable. Al igual que antes, el valor de q es el valor obtenido a partir de las Ec.17 y Ec.18.

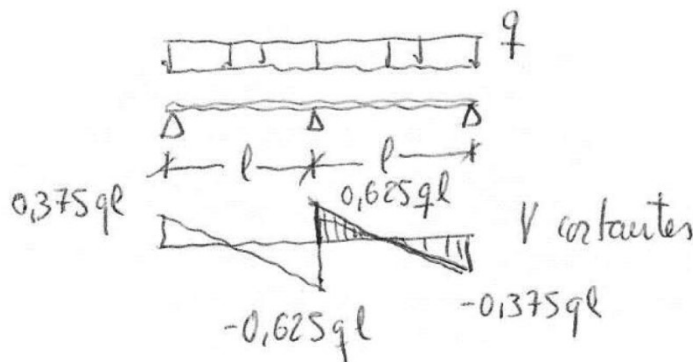


Figura 1. Distribución de esfuerzos a cortante en los extremos y en el punto central de una viga continua biapoyada.

La tensión máxima a cortante considerando un factor que incorpore el efecto de posibles fendas en la madera k_{cr} ($=0.5$) es de:

$$\tau_d = \frac{4}{3} \cdot \frac{V_d}{k_{cr} \cdot A} \quad \text{Ec. 19}$$

La resistencia de cálculo a cortante o a flexión es la siguiente:

$$f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{\gamma_M} \quad (\text{N/mm}^2) \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

f_d = resistencia de cálculo (a flexión o a cortante, según el caso)

f_k = resistencia característica (a flexión o a cortante, según el caso)

De la comparación de los anteriores valores se determina si la pieza cumple o no (resistencia de cálculo > tensión máxima de cálculo)

Las anteriores expresiones son utilizadas en las hojas Excel desarrolladas por Menegazzi&Palmeri (2013)

Por otro lado, las comprobaciones de estabilidad externa se pueden realizar a partir de las hojas Excel desarrolladas por Menegazzi&Palmeri (2013)

5.1. EJEMPLO PRÁCTICO 1

A continuación, se desarrolla un primer ejemplo en el que se realiza una aplicación práctica de la metodología propuesta. En este primer caso, se incluye un escenario tipo clima atlántico.

El ejemplo se ha centrado en las comprobaciones de estabilidad interna de un entramado de madera con el objetivo de reflejar las modificaciones y consecuencias debidas a las pérdidas de sección de las piezas. Las comprobaciones de estabilidad interna se realizan de acuerdo a las expresiones incluidas en el anterior epígrafe.

Se incluye también la estimación de los efectos de refuerzo de las raíces y su incorporación en el análisis de estabilidad de la FASE 3.

5.1.1. Datos de partida

Se plantea construir un entramado de madera de 2,0 m de altura y 2 m de base. La longitud de pandeo de los troncos longitudinales es de 2,0 m.

Tras un estudio geotécnico y la realización de un ensayo de corte directo, se han obtenido los siguientes datos del terreno (valores de cálculo):

Cohesión = 1,5 kPa

Ángulo de fricción interna = 30°

Peso específico terreno = 19,5 kN/m³

El acabado del talud del trasdós será de 30°.

Con los anteriores datos, teniendo en cuenta una inclinación del frente del entramado de 60°, se obtiene un coeficiente de empuje activo (k_a ; Teoría de Coulomb) igual a 0.335.

Inicialmente, se propone la utilización de troncos de madera con un diámetro mínimo de 0,2 m.

Se utilizará madera de *Pinus radiata*. Las propiedades mecánicas utilizadas en este ejemplo son las siguientes:

La resistencia característica a flexión es de 18 N/mm²

La resistencia característica a cortante es de 3,4 N/mm²

La madera estará apoyada directamente sobre el terreno por lo que la madera trabajará bajo una clase de servicio 3. El valor de K_{mod} es igual a 0,5.

El coeficiente de minoración de la resistencia característica es de 1,3.

Se incluye un coeficiente de minoración de resistencia a cortante por presencia de fendas (k_{cr}) igual a 0,5.

Se pide dimensionar y justificar el diseño del entramado de madera en el corto y largo plazo utilizando la metodología Tardío & Mickovski.

5.1.2. Comprobaciones de la FASE 1

Se realiza a continuación la comprobación de estabilidad interna a flexión y a cortante. En la estructura por fases incluida en la metodología Tardío & Mickovski, en la FASE 1 los procesos de deterioro no están activos y los efectos de refuerzo de la vegetación no se tienen en cuenta.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Comprobación a flexión

	input	
peso específico (kN/m ³)	19.5	valor tabulado
peso específico (N/m ³)	19500	
carga aplicada acc (N/m ²)		
Carga total aplicada (N/m ³)	39000	H*gamma+Q
diámetro (m):	0.2	[
Altura muro (m)	2	
Modulo resistente W (m ⁴):	0.00078500	
Longitud pandeo (m)	2	
Carga (N/m):	3919.5	coef empuje =0.335
Modulo resistente W (m ⁴):	0.00078500	
Momento(N m):	2547.68	gamma_d =1.3
Sigma admisible (N/mm ²)	18.00	Pinus radiata
Sigma admisible diseño (N/mm ²)	6.92	coef seg = 1,3
Sigma resultante	3.25	Cumple

Comprobación a cortante

	input	
peso específico (kN/m ³)	19.5	Valor tabulado
peso específico (N/m ³)	19500	
carga aplicada acc (N/m ²)		
suma del peso aplicado (N/m ³)	19500	
diámetro (m):	0.2	
altura (m)	2	
dimensionamiento al metro	2	
Coef. Empuje	0.335	
Carga (N/m):	6532.5	
Sigma admisible (N/mm ²)	3.40	Pinus radiata
Sigma admisible de diseño (N/mm ²)	1.31	coef seg = 1,3
Sigma resultante	0.55	Cumple

Por tanto, en el corto plazo (en la FASE 1), el entramado es mecánicamente estable.

5.1.3. Análisis de los procesos de deterioro de la madera en el caso del ejemplo propuesto

Para las comprobaciones de la FASE 2 de la metodología Tardío & Mickovski es necesario estimar el avance de los procesos de deterioro de los troncos de madera. Como primera iteración se analiza un hito temporal mínimo igual a 15 años (tras la finalización de las obras)

Los datos necesarios para la estimación de los coeficientes del modelo de Leicester *et al* (2003) son los siguientes:

Precipitación anual media en la zona de intervención: 1200 mm

Temperatura media anual en la zona de intervención: 11,5 °C

Número de meses secos en la zona de intervención: 0 meses

De acuerdo a los anteriores valores, para el cálculo de K_{CLIMA} utilizaremos las ecuaciones 3, 3.2 y 3.4 del método de Leicester *et al.* (2003). Tras la aplicación de las fórmulas se obtiene el siguiente valor:

$$K_{CLIMA} = 0,85$$

Para la obtención del coeficiente de madera se utiliza la siguiente información:

- Se va a utilizar madera de *Pinus radiata*. Esta madera es de baja durabilidad (tipo 4)
- Los troncos de madera tienen 20 cm de diámetro. Por tanto, se trata de piezas con un alto contenido en madera juvenil.

Aplicando la ecuación 2, a partir de los anteriores datos, se obtiene un coeficiente para la madera (K_{MADERA} ; Leicester *et al*, 2003) de:

$$K_{MADERA} = 2,72$$

Mediante la aplicación de la ecuación 1, se obtiene la tasa de avance de los procesos de deterioro = r (mm/año) = 4,94 mm /año

Mediante la aplicación de la ecuación 4, se obtiene el tiempo de retardo (t_0) (número de años hasta que se activan los procesos de deterioro de la madera) = 1,2 años.

Por tanto, la parte del radio afectado por los procesos de deterioro tras 15 años de vida de servicio, de acuerdo a la ecuación 5, es igual a:

$$d_t = 68,1 \text{ mm}$$

El diámetro eficaz (diámetro no afectado por los procesos de deterioro) tras 15 años es de 6,4 cm.

5.1.4. Comprobaciones de la FASE 2

Utilizando los anteriores datos y de acuerdo a la metodología Tardío & Mickovski, a continuación se realiza la comprobación de estabilidad interna del entramado tras la pérdida de sección de los troncos. Esta comprobación corresponde a la FASE 2 de la metodología en la que no se incluyen los efectos de refuerzo y estabilización de la vegetación. El objetivo consiste en asegurar, con las estructuras instaladas y comprobadas en la FASE 1, un marco temporal mínimo que permita el desarrollo adecuado de la vegetación.

En la nueva situación, los resultados obtenidos son los siguientes:

	input	
peso específico (kN/m ³)	19.5	valor tabulado
peso específico (N/m ³)	19500	
carga aplicada acc (N/m ²)		
Carga total aplicada (N/m ³)	39000	H*gamma+Q
diámetro (m):	0.064	
Altura muro (m)	2	
Modulo resistente W (m ⁴):	0.00002572	
Longitud pandeo (m)	2	
Carga (N/m):	1254.24	coef empuje =0.335
Modulo resistente W (m ⁴):	0.00002572	
Momento(N m):	815.26	gamma_d =1.3
Sigma admisble (N/mm ²)	18.00	<i>Pinus radiata</i>
Sigma admisible diseño (N/mm ²)	6.92	coef seg = 1,3
Sigma resultante	31.69	No cumple!!!

Se comprueba que los troncos no aseguran una estabilidad mecánica del entramado durante el periodo mínimo de 15 años. Por tanto, se ha de aumentar el diámetro mínimo de los elementos de madera.

Se propone utilizar un diámetro mínimo de 30 cm. En este nuevo caso, tras 15 años de vida de servicio de la obra, el nuevo diámetro de los troncos es de 16,4 cm y los resultados de la comprobación de estabilidad interna son los siguientes:

	input	
peso específico (kN/m ³)	19,5	valor tabulado
peso específico (N/m ³)	19500	
carga aplicada acc (N/m ²)		
Carga total aplicada (N/m ³)	39000	H*gamma+Q
diámetro (m):	0.16	
Altura muro (m)	2	
Modulo resistente W (m ⁴):	0.00040192	
Longitud pandeo (m)	2	
Carga (N/m):	3135.6	coef empuje =0.335
Modulo resistente W (m ⁴):	0.00040192	
Momento (N m):	2038.14	gamma_d =1.3
Sigma admisible (N/mm ²)	18.00	<i>Pinus radiata</i>
Sigma admisible diseño (N/mm ²)	6.92	coef seg = 1,3
Sigma resultante	5.07	Cumple

El entramado es estable tras 15 años de vida de servicio. Por tanto, se establece un diámetro mínimo de 30 cm. Esta sería la principal conclusión de las comprobaciones incluidas en la FASE 2 de la metodología Tardío & Mickovski.

Por otro lado, el diámetro con el que la estructura alcanza su estado límite último es 14 cm. De acuerdo al avance de los procesos de deterioro de la madera, dicho diámetro se alcanza a los 17,4 años. Este valor se obtiene al dividir, la pérdida en radio (= 16/2 cm) entre la tasa de avance de los procesos de deterioro (r = 0,494 cm/año). Por tanto, el entramado es mecánicamente estable hasta un periodo máximo de 17,4 años (incluyendo el tiempo de retardo)

Por otro lado, en caso de también disminuir la longitud de pandeo de los troncos longitudinales del entramado hasta 1,5 m, la estabilidad mecánica última se alcanzaría a los 20,4 años de vida de servicio. Estas cifras son similares a las obtenidas en el seguimiento de obras de bioingeniería en el caso de utilización de madera de pino de baja durabilidad. En esta situación, la vegetación tendría un total de 20,4 años para desarrollar sus efectos de refuerzo en solape con el efecto estabilizador del entramado.

5.1.5. Comprobaciones de la FASE 3

En la obra se ha utilizado como especie principal el *Crataegus monogyna* ya que se reproduce bien vegetativamente (a partir de estacas o ramas vivas). Esta especie tiene una profundidad de enraizamiento máxima de cerca de 2 m. Su sistema radical es de tipo cónico.

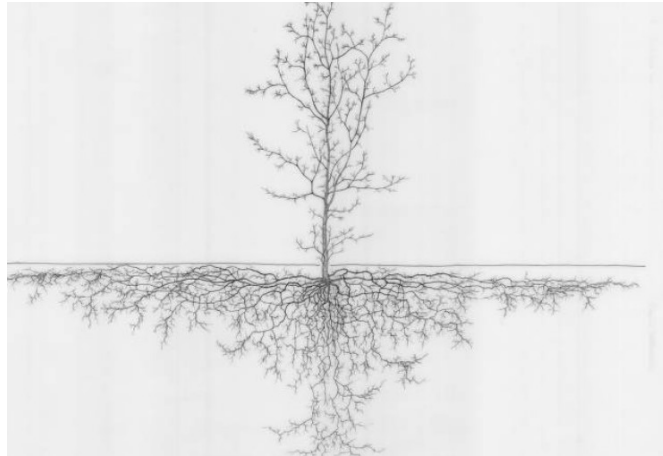


Figura 6 Imagen de la morfología del sistema radical del *Crataegus monogyna* (fuente: <https://images.wur.nl/digital/collection/coll13>)

A partir de un trabajo de campo, se han encontrado ejemplares adultos de *Crataegus monogyna*. Tras diversas mediciones, se ha obtenido un valor de altura de 3.0 m. Se ha encontrado que, en el caso de esta especie, la relación profundidad radical/altura epígea es de 0,5. Según lo anterior, se obtienen una profundidad de 1,5 m (valor que coincide con los datos existentes en distintas publicaciones)

La sección a la altura del cuello de la raíz es de $0,009 \text{ m}^2$ (= A_{r_0} de la ecuación 10)

Por otro lado, también conocemos otra relación alométrica de esta especie: la relación anchura sistema radical, anchura copa. En este caso, el valor es de 1,6.

Midiendo en campo la anchura (diámetro) de la copa se ha obtenido un valor de 2,5 m. Por tanto, la anchura ($2 \cdot R$; ver variable R en la TABLA 2) del sistema radical es de 4,0 m.

Por otro lado, tras búsqueda en bibliografía, el valor de la resistencia media a tracción de las raíces de esta especie es de 15,5 MPa (<https://www.mdpi.com/1999-4907/10/4/341>)

El valor medio de profundidad (b_m) es de $0,33 \cdot 1,5 = 0,49 \text{ m}$ (ver TABLA 2; distribución teórica de tipo cónico)



Figura 7 Volumen del entramado ocupado por las raíces de la vegetación. Adaptado de Florineth (2012)

Á continuación se calcula, para una profundidad igual a 1,0 m (mitad del valor de la altura del entramado) el valor de la $Ar(z)$. Para ello, en la ecuación 10 se utilizan los valores de b_m y Ar_0 . Se obtiene un $Ar(z=1.0\text{ m}) = 0.0012\text{m}^2$.

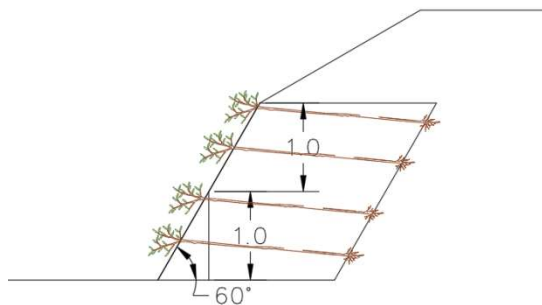


Figura 8 El material vegetal utilizado en la mitad y en coronación del entramado se utiliza para el cálculo del valor de cohesión adicional (refuerzo de las raíces). Este valor es conservador ya que, para cada una de las mitades del cuerpo del entramado, se utiliza el menor valor de cohesión adicional existente en su interior.

Por otro lado, la superficie explorada por las raíces a la profundidad de 1,0 m ($Ars(z=1.0\text{ m})$), bajo la hipótesis de una distribución cónica de las raíces, es igual a 4.0 m² (ver Tabla 2)

A partir de los anteriores valores, utilizando la ecuación 9, se obtiene una $RAR(z=1.0\text{ m}) = 0.0003$.

Para el cálculo de la cohesión adicional a la profundidad de 1,0 m, se utilizan las ecuación 7 y 8, obteniéndose un valor de $c_r(z = 1.0 \text{ m}) = 2.5 \text{ kPa}$ (este valor es del orden de los valores encontrados en la literatura científica)

A continuación, se calcula el valor del factor de estabilidad (FS) de la ladera. Existen numerosos métodos de análisis de estabilidad de taludes. Dentro del grupo de los métodos de equilibrio límite (MEL), a efectos meramente didácticos, se ha seleccionado un método sencillo llamado Método de Bishop. Para el análisis de estabilidad se puede utilizar software comercial o gratuito. Dentro de este último caso, una opción consiste en el programa ssap (slope stability analysis program; https://www.ssap.eu/index_en.html) desarrollado por el equipo de profesor Borselli (Borselli, 2013)

En este caso, el valor de la cohesión del terreno vegetado es igual 4,0 Kpa que corresponde a la suma de la cohesión del terreno sin raíces (= 1,5 kPa) y el valor de la cohesión adicional debida a las raíces ($c_r = 2,5 \text{ kPa}$)

Se analiza una superficie de deslizamiento que atraviesa el cuerpo del entramado (supuestamente ya deteriorado y cuyo volumen está ocupado por las raíces del material vegetal). Se obtiene un FS igual a 1,14. Por tanto, tras 15 años de vida de servicio de la obra, la ladera es estable (ya sin el papel estructural del entramado)

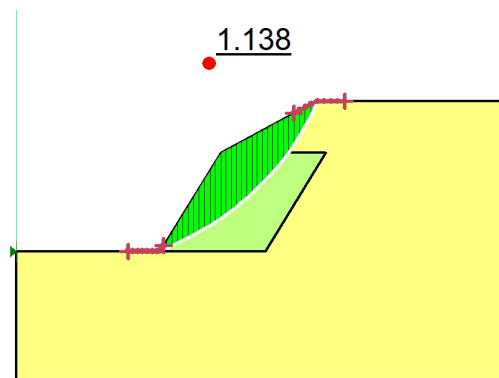


Figura 9 Factor de estabilidad igual a 1,14

Como ya se ha comentado, el valor de cohesión utilizado para el terreno vegetado es conservador ya que se ha supuesto un valor de cohesión homogéneo en todo el cuerpo del entramado. La presencia de raíces será mayor dentro del cuerpo del entramado ya que existirá solape del volumen explorado por las diferentes ramas y/o estacas vivas utilizadas en la obra de bioingeniería. Aparte, las condiciones para el crecimiento y desarrollo de los sistemas radicales dentro del cuerpo del entramado suelen ser adecuadas debido a la presencia de nutrientes liberados lentamente por la

madera en descomposición y a la mayor disponibilidad de oxígeno y humedad en la matriz del suelo.

Aparte, dado que la estructura de madera es estable hasta el $t = 20,4$ años, se obtiene un margen de seguridad temporal para asegurar el solape de las funciones estabilizadoras de $20,4 - 15 = 5,4$ años. Es decir, la vegetación podrá desarrollarse al ser la ladera estable.

Existen diferentes métodos para analizar la estabilidad global de una ladera vegetada. Queda al criterio del técnico la selección del método y enfoque a seguir.

5.1.6. Conclusiones caso práctico 1

A partir de la aplicación de la metodología Tardío&Mickovski se obtienen las siguientes conclusiones:

- El diámetro mínimo planteado inicialmente no asegura un periodo mínimo de estabilidad estructural de 15 años para el entramado. Se ha detectado un escenario crítico en el largo plazo que ha de ser solucionado.
- Es necesario utilizar un diámetro mínimo de 30 cm para los troncos de madera.
- Otra opción consiste en la reducción de la longitud de pandeo de las celdas de entramado.
- El margen temporal de seguridad para asegurar el correcto trasvase de las funciones estabilizadoras entre la estructura y la vegetación es de: $20,4 - 15 = 5,4$ años. El entramado ofrece un escenario estable durante un total de 20,4 años.
- Otra opción para mejorar el diseño consiste en la utilización de una especie de madera de mayor durabilidad natural (por ejemplo, el castaño). En este caso, habría que recalcular el valor de la tasa de avance de los procesos de deterioro de la madera (r ; ecuación 1) para re-evaluar la situación.

Es decir, en este momento, el técnico ha de tomar una serie de decisiones para continuar con la propuesta de diseño del entramado de madera. En este caso, se opta tanto por el aumento del diámetro de las piezas como por la disminución de la longitud de pandeo del entramado.

Sería necesario realizar una comparativa económica entre el volumen de madera necesario con el diseño propuesto y el volumen de madera necesario en el caso de utilizar una especie de mayor durabilidad y mejores propiedades mecánicas.

5.2. EJEMPLO PRÁCTICO 2

En este caso, se incluye un escenario tipo clima mediterráneo.

5.2.1. Datos de partida

Se plantea construir un entramado de madera de 2,0 m de altura y 2 m de base. La longitud de pandeo de los troncos longitudinales es de 2,0 m.

Tras un estudio geotécnico y la realización de un ensayo de corte directo, se han obtenido los siguientes datos del terreno (valores de cálculo):

Cohesión = 5 kPa

Ángulo de fricción interna = 30°

Peso específico terreno = 20,10 kN/m³

El acabado del talud del trasdós será de 30°.

Con los anteriores datos, teniendo en cuenta una inclinación del frente del entramado de 60°, se obtiene un coeficiente de empuje activo (k_a ; Teoría de Coulomb) igual a 0.335.

Inicialmente, se propone la utilización de troncos de madera con un diámetro mínimo de 0,2 m.

Se utilizará madera de *Castanea sativa*. Las propiedades mecánicas utilizadas en este ejemplo son las siguientes:

La resistencia característica a flexión es de 28 N/mm²

La resistencia característica a cortante es de 3,6 N/mm²

La madera estará apoyada directamente sobre el terreno por lo que la madera trabajará bajo una clase de servicio 3. El valor de K_{mod} es igual a 0,5.

El coeficiente de minoración de la resistencia característica es de 1,3.

Se incluye un coeficiente de minoración de resistencia a cortante por presencia de fendas igual a 0,5.

Se pide dimensionar y justificar el diseño del entramado de madera en el corto y largo plazo utilizando la metodología Tardío & Mickovski.

5.2.2. Comprobaciones de la FASE 1

Se realiza a continuación la comprobación de estabilidad interna a flexión y a cortante. En la estructura por fases incluida en la metodología Tardío & Mickovski, en la FASE 1 los procesos de deterioro no están activos y los efectos de refuerzo de la vegetación no se tienen en cuenta.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Comprobación a flexión

	input	
peso específico (kN/m ³)	20.1	valor tabulado
peso específico (N/m ³)	20100	
carga aplicada acc (N/m ²)		
Carga total aplicada (N/m ³)	40200	H*gamma+Q
diámetro (m):	0.2	[
Altura muro (m)	2	
Modulo resistente W (m ⁴):	0.00078500	
Longitud pandeo (m)	2	
Carga (N/m):	4040.1	coef empuje =0.335
Modulo resistente W (m ⁴):	0.00078500	
Momento (N m):	2626.07	gamma_d =1.3
Sigma admisible (N/mm ²)	28.00	Catanea sativa
Sigma admisible diseño (N/mm ²)	10.77	coef seg = 1,3
Sigma resultante	3.35	Cumple

Comprobación a cortante

	input	
peso específico (kN/m ³)	20.1	Valor tabulado
peso específico (N/m ³)	20100	
carga aplicada acc (N/m ²)	0	
suma del peso aplicado (N/m ³)	20100	
diámetro (m):	0.2	
altur (m)	2	
dimensionamiento al metro	2	
Coef. Empuje	0.335	
Carga (N/m):	6733.5	
Sigma admisible (N/mm ²)	3.60	Castanea sativa
Sigma admisible de diseño (N/mm ²)	1.38	coef seg = 1,3
Sigma resultante	0.57	Cumple

Por tanto, en el corto plazo (en la FASE 1), el entramado es mecánicamente estable.

5.2.3. Análisis de los procesos de deterioro de la madera en el caso del ejemplo propuesto

Para las comprobaciones de la FASE 2 de la metodología Tardío&Mickovski es necesario estimar el avance de los procesos de deterioro de los troncos de madera. Como primera iteración se analiza un hito temporal mínimo igual a 15 años (tras la finalización de las obras)

Los datos necesarios para la estimación de los coeficientes del modelo de Leicester *et al* (2003) son los siguientes:

Precipitación media anual en la zona de intervención: 749 mm

Temperatura media anual en la zona de intervención: 15,5 °C

Número de meses secos en la zona de intervención: 0 meses

De acuerdo a los anteriores valores, para el cálculo de K_{CLIMA} utilizaremos las ecuaciones 3, 3.2 y 3.4 del método de Leicester *et al.* (2003). Tras la aplicación de las fórmulas se obtiene el siguiente valor:

$$K_{CLIMA} = 1,75$$

Para la obtención del coeficiente de madera se utiliza la siguiente información:

- Se va a utilizar madera de *Castanea sativa*. Esta madera es de tipo durable (tipo 2)
- Los troncos de madera tienen 20 cm de diámetro. Por tanto, se trata de piezas con un alto contenido en madera juvenil.

Aplicando la ecuación 2, a partir de los anteriores datos, se obtiene un coeficiente para la madera (K_{MADERA} ; Leicester *et al*, 2003) de:

$$K_{MADERA} = 0,96 (= 0.48*2)$$

Mediante la aplicación de la ecuación 1, se obtiene la tasa de avance de los procesos de deterioro = r (mm/año) = 1,68 mm /año

Mediante la aplicación de la ecuación 4, se obtiene el tiempo de retardo (t_0) (número de años hasta que se activan los procesos de deterioro de la madera) = 3,36 años.

Por tanto, la parte del radio afectado por los procesos de deterioro tras 15 años de vida de servicio, de acuerdo a la ecuación 5, es igual a:

$$d_t = 19,53 \text{ mm}$$

El diámetro eficaz (diámetro no afectado por los procesos de deterioro) tras 15 años es de 16 cm.

5.2.4. Comprobaciones de la FASE 2

Comprobación a flexión

	input	
peso específico (kN/m ³)	20.1	valor tabulado
peso específico (N/m ³)	20100	
carga aplicada acc (N/m ²)		
Carga total aplicada (N/m ³)	40200	H*gamma+Q
diámetro (m):	0.16	
Altura muro (m)	2	
Modulo resistente W (m ⁴):	0.00040192	
Longitud pandeo (m)	2	
Carga (N/m):	3232.08	coef empuje =0.335
Modulo resistente W (m ⁴):	0.00040192	
Momento(N m):	2100.85	gamma_d =1.3
Sigma admisible (N/mm ²)	28.00	Catanea sativa
Sigma admisible diseño (N/mm ²)	10.77	coef seg = 1,3
Sigma resultante	5.23	Cumple

Comprobación a cortante

	input	
peso específico (kN/m ³)	20.1	Valor tabulado
peso específico (N/m ³)	20100	
carga aplicada acc (N/m ²)	0	
suma del peso aplicado (N/m ³)	20100	
diámetro (m):	0.16	
altur (m)	2	
dimensionamiento al metro	2	
Coef. Empuje	0.335	
Carga (N/m):	5386.8	
Sigma admisible (N/mm ²)	3.60	Castanea sativa
Sigma admisible de diseño (N/mm ²)	1.38	coef seg = 1,3
Sigma resultante	0.71	Cumple

Por tanto, el entramado es estable tras 15 años de vida de servicio. Es decir, la estructura es capaz de estabilizar la ladera permitiendo, a su vez, el adecuado desarrollo de la vegetación.

Por otro lado, el diámetro con el que la estructura alcanza su estado límite último es 12 cm. De acuerdo al avance de los procesos de deterioro de la madera, dicho diámetro se alcanza a los 28 años (incluyendo el valor de 3.36 años de tiempo de retraso). Este valor se obtiene al dividir, la pérdida en diámetro (= 8 cm; 4 cm de radio) entre la tasa de avance de los procesos de deterioro (r

= 0,168 cm/año). Por tanto, el entramado es mecánicamente estable hasta un periodo máximo de 28 años y la vegetación dispondría de este periodo de tiempo para desarrollar sus efectos de refuerzo en solape con el efecto estabilizador del entramado..

5.2.5. Comprobaciones de la FASE 3

En la obra se ha utilizado como especie principal el *Salix eleagnos* ya que se reproduce bien vegetativamente (a partir de estacas o ramas vivas). Esta especie tiene una profundidad de enraizamiento máxima de 2,0 - 2,5 m. Su sistema radical es de tipo cilíndrico (amplio y profundo).

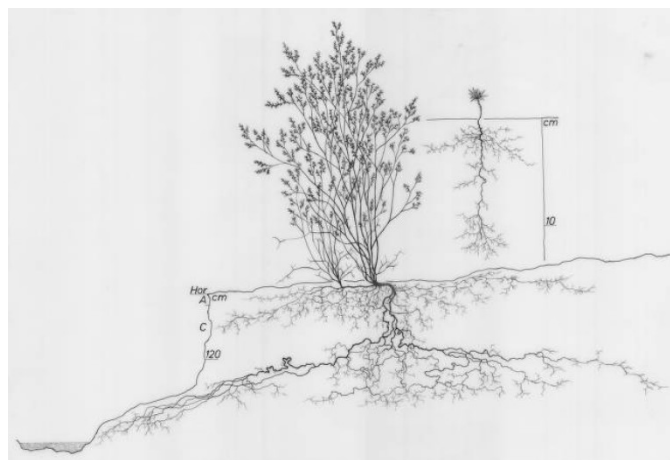


Figura 10 Imagen de la morfología del sistema radical del *Salix eleagnos* (fuente: <https://images.wur.nl/digital/collection/coll13>)

A partir de un trabajo de campo, se han encontrado ejemplares adultos de *Salix eleagnos*. Tras diversas mediciones, se ha obtenido un valor de altura de 4.0 m. Se ha encontrado que, en el caso de esta especie, la relación profundidad radical/altura epígea es de 0,5. Según lo anterior, se obtienen una profundidad de 2,0 m (valor que coincide con los datos existentes en distintas publicaciones)

La sección a la altura del cuello de la raíz es de $0,015 \text{ m}^2$ (= A_{r0} de la ecuación 10)

Por otro lado, a partir de publicaciones se ha obtenido que un ejemplar adulto de esta especie tiene aproximadamente 50 m³ de volumen radical.

A partir del anterior dato y de la ecuación 12, se obtiene un radio para la extensión del sistema radical de 2,8 m.

Por otro lado, tras búsqueda en bibliografía, el valor de la resistencia media a tracción de las raíces de esta especie es de 20,0 MPa (valor medio dentro del género *Salix spp.*)

El valor medio de profundidad (b_m) es de $0,5 \cdot 2,0 = 1,0$ m (ver TABLA 2; distribución teórica de tipo cilíndrico)

Á continuación se calcula, para una profundidad igual a 1,0 m (mitad del valor de la altura del entramado) el valor de la $A_r(z)$. Para ello, en la ecuación 10 se utilizan los valores de b_m y A_{r0} . Se obtiene un $A_r(z=1.0 \text{ m}) = 0.0057 \text{ m}^2$.

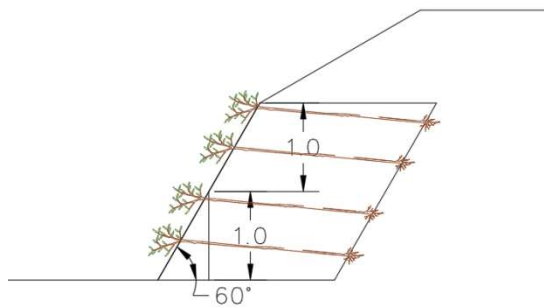


Figura 11 El material vegetal utilizado en la mitad y en coronación del entramado se utiliza para el cálculo del valor de cohesión adicional (refuerzo de las raíces). Este valor es conservador ya que, para cada una de las mitades del cuerpo del entramado, se utiliza el menor valor de cohesión adicional existente en su interior.

Por otro lado, la superficie explorada por las raíces a la profundidad de 1,0 m ($A_{rs}(z=1.0 \text{ m})$), bajo la hipótesis de una distribución cilíndrica de las raíces, es igual a 31,83 m² (ver Tabla 2)

A partir de los anteriores valores, utilizando la ecuación 9, se obtiene una $RAR(z=1.0 \text{ m}) = 0.00018$.

Para el cálculo de la cohesión adicional a la profundidad de 1,0 m, se utilizan las ecuación 7 y 8, obteniéndose un valor de $c_r(z = 1.0 \text{ m}) = 1,96 \text{ kPa}$ (este valor es del orden de los valores encontrados en la literatura científica)

A continuación, se calcula el valor del factor de estabilidad (FS) de la ladera. Existen numerosos métodos de análisis de estabilidad de taludes. Dentro del grupo de los métodos de equilibrio límite (MEL), a efectos meramente didácticos, se ha seleccionado un método sencillo llamado Método de Bishop.

En este caso, el valor de la cohesión del terreno vegetado es igual 6,96 Kpa que corresponde a la suma de la cohesión del terreno sin raíces (= 5 kPa) y el valor de la cohesión adicional debida a las raíces ($c_r = 1,96 \text{ kPa}$).

Se analiza una superficie de deslizamiento que atraviesa el cuerpo del entramado (supuestamente ya deteriorado y cuyo volumen está ocupado por las raíces del material vegetal). Se obtiene un FS igual a 1,49. Por tanto, tras 15 años de vida de servicio de la obra, la ladera es estable (ya sin el papel estructural del entramado)

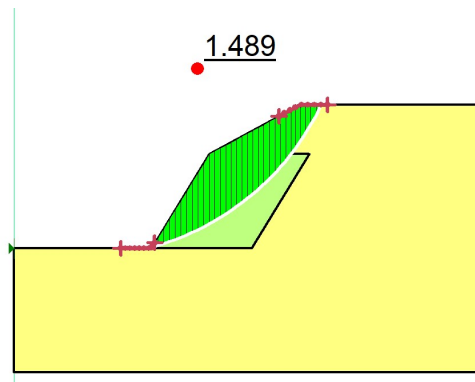


Figura 12 Factor de estabilidad igual a 1,49

El valor de cohesión utilizado para el terreno vegetado es conservador ya que se ha supuesto un valor de cohesión homogéneo en todo el cuerpo del entramado. La presencia de raíces será mayor dentro del cuerpo del entramado ya que existirá solape del volumen explorado por las diferentes ramas y/o estacas vivas utilizadas en la obra de bioingeniería. Aparte, las condiciones para el crecimiento y desarrollo de los sistemas radicales dentro del cuerpo del entramado suelen ser adecuadas debido a la presencia de nutrientes liberados lentamente por la madera en descomposición y a la mayor disponibilidad de oxígeno y humedad en la matriz del suelo.

Aparte, dado que la estructura de madera es estable hasta el $t = 28$ años, se obtiene un margen de seguridad temporal para asegurar el solape de las funciones estabilizadoras de $28 - 15 = 13$ años. Es decir, la vegetación podrá desarrollarse al ser la ladera estable.

Existen diferentes métodos para analizar la estabilidad global de una ladera vegetada. Queda al criterio del técnico la selección del método y enfoque a seguir.

5.2.6. Conclusiones caso práctico 2

A partir de la aplicación de la metodología Tardío&Mickovski se obtienen las siguientes conclusiones:

- El diámetro mínimo planteado inicialmente asegura un periodo mínimo de estabilidad estructural de 15 años para el entramado.

- El margen temporal de seguridad para asegurar el correcto trasvase de las funciones estabilizadoras entre la estructura y la vegetación es de: $28 - 15 = 13$ años. El entramado asegura un escenario estable durante un total de 28 años.

6. Bibliografía

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 (Northern Italy). *Plant and Soil*, 278, 11–22.

BISCHETTI, GB; DE CESARE, G; MICKOVSKI, SB; RAUCH, HP; SCHWARZ, M; STANGL, R. Design and temporal issues in Soil Bioengineering structures for the stabilisation of shallow soil movements. *ECOL ENG*. 2021; 169, 106309.

BÖHM, W., 1979. *Methods of Studying Root Systems*. Springer Verlag, Berlin, pp.275.

BORSELLI L. 2013. Advanced 2D Slope stability Analysis by LEM by SSAP software: a full freeware tool for teaching and scientific community. IN "ICL Landslide Teaching Tools". KyojiSassa, Bin He, Mauri McSaveney, Osamu Nagai (EDS.). International Consortium on Landslides (ICL). PP. 428. ISBN: 978-4-9903382-2-0.

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.

FERNANDES, J.P., GUIOMAR, N. Simulating the stabilization effect of soil bioengineering interventions in Mediterranean environments using limit equilibrium stability models and combinations of plant species. *Ecological Engineering*. 2016. 88 (2016) 122–142. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.12.035>.

FLORINETH, F., 2012. *Pflanzen statt Beton Sichern and gestalten mit Pflanzen*. PatzerVerlag, Berlin–Hannover.

GRAY, D.H., LEISER, A.T., 1982. *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*. Van Nostrand Reinhold, New York.

GRAY, D.H., SOTIR, R.B., 1996. *Biotechnical and Eco-engineering Slope Stabilization*. Wiley, New York, p. 276.

LAIO, F., D'ODORICO, P., RIDOLFI, L., 2006. An analytical model to relate the vertical root distribution to climate and soil properties. *Geophys. Res. Lett.* 33, L18401.

LEICESTER, R. H., WANG, C-H, NGYEN, M. N., THORNTON, J. D., JOHNSON, G., GARDNER, D., FOLIENTE, G. C., MACKENZIE, C., 2003. An engineering model for the decay in wood in ground

contact. Document No IRGWP 03- 20260. International Research Group on Wood Protection, Stockholm.

MENEGAZZI, G., & PALMERI, F., 2013. Ildimensionamentodelle opere diIngegneriaNaturalistica. DirezioneInfrastrutture, Ambiente e PoliticheAbitative. Regione Lazio.

NORRIS, J.E.; STOKES, A.; MICKOVSKI, S.B.; CAMMERAAT, E.; VAN BEEK, R.; NICOLL, B.C.; ACHIM, A. (Eds.) Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions. 2008, VI, 290 p., Hardcover. Springer.

PRETI, F., DANI, A., NOTO, L.V., ARNONE, E., 2022. On the Leonardo's rule for the assessment of root profile. Ecological Engineering 179 (2022) 106620.

PRETI, F., DANI, A., LAIO, F., 2010. Root profile assessment by means of hydrological,pedological and above-ground vegetation information for bio-engineeringpurposes. Ecol. Eng. 36, 305–316.

SCHIECHTL, H.M. 1980. Bioengineering for land reclamation and conservation. Univ. of Alberta Press. Edmonton/Alberta.

SCHIECHTL, H. M., STERN, R. 1996. Ground Bioengineering Techniques: For Slope Protection and Erosion Control. Wiley-Blackwell, ISBN 10: 0632040610, ISBN 13: 9780632040612.

SCHWARZ, M., COHEN, D., OR, D., 2010. Root–soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles. J. Geophys. Res. 115

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. In: Proceedings of the seventh International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SMEC).

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., 2015. Method for synchronisation of soil and root behaviour for assessment of stability of vegetated slopes. J. Ecol. Eng. 82,222–230.

Tardío, G., Mickovski, S.B., Rauch, H.P., Fernandes, J.P., Acharya, M.S., 2018. The use of bamboo for erosion control and slope stabilization: Soil Bioengineering Works. In: Khalil, H.P.S. Abdul (Ed.), Bamboo - Current and Future Prospects, 105-132; intechopen, London, ISBN 978-1-78923-231-8..

TRON, S., DANI, A., LAIO, F., PRETI, F., RIDOLFI, L., 2014. Geophysical Research Abstract, Vol. 14. EGU General Assembly, pp. 2012 (EGU2012-10739).

WALDRON, L. J. Shear resistance of root-permeated homogenous and stratified soil. Soil Science Society of America Journal. 1977. 41(5): 843-849

WANG, C. H., LEICESTER, R. H., FOLIENSTE, G. C., NGUYEN, M. N., 2007. Wood service life design guide. Forest and Wood Products Australia Limited.115 pp.

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.

ZAIMES, G.N., TARDÍO, G., IAKOVOGLOU, V., GIMENEZ, M., GARCIA-RODRIGUEZ, J.L., 2019. New tools and approaches to promote soil and water bioengineering in the Mediterranean. *Science of the Total Environment* 693 (2019) 133677.

7. Agradecimientos

Agradezco la revisión detallada y sugerencias realizadas por los miembros de la Junta Directiva de la AEIP. Sin duda, sus esfuerzos han contribuido a la mejora del presente manual.



www.aeip.org.es