

Article basat en el treball:

Tardío, G., Mickovski, S. B., 2016. Implementation of eco-engineering design into existing slope stability design practices. *J. Ecol. Eng.* 92, 138–147.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.03.036>.

## **TÍTOL: METODOLOGIA DE DISSENY I CÀLCUL D'OBRES DE BIOENGINYERIA DEL PAISATGE**

**AUTOR:** Guillermo Tardío. Doctor Enginyer de Monts. Associació d'Enginyeria del Paisatge. Universitat Politècnica de Madrid. [gtarcer@gmail.com](mailto:gtarcer@gmail.com)

### **RESUM**

Es planteja una metodologia per al càlcul dels treballs de bioenginyeria del paisatge, reflectint les principals particularitats d'aquestes intervencions. El caràcter dinàmic de les obres de bioenginyeria del paisatge, els canvis més importants i els possibles escenaris crítics queden recollits en la metodologia proposada. Així mateix, s'incorporen les connexions a la fase de seguiment i les possibilitats de millora contínua com a característica essencial de la línia d'aquestes intervencions.

**Paraules clau:** solucions basades en la natura, estabilització de vessants, reforç d'arrels, seguiment de la construcció, deteriorament de la fusta.

### **INTRODUCCIÓ**

La bioenginyeria del paisatge comprèn una sèrie de tècniques que utilitzen material vegetal viu com a material de construcció, sol o combinat amb materials inerts, dins l'àmbit de la restauració ambiental (Schiechtl, 1980). La bioenginyeria fluvial i del sòl són eines sostenibles per a millorar la resiliència contra la pèrdua i degradació del sòl (Schiechtl & Stern, 1996).

Segons l'estratègia i la filosofia de les obres de bioenginyeria del paisatge, els materials que inicialment aporten rigidesa i estabilitat al vessant o al marge, aniran cedint la seva funció estabilitzant a la vegetació en desenvolupament. L'objectiu final perseguit és que la vegetació sigui l'agent principal i/o únic responsable de l'estabilitat i el reforç de la zona d'intervenció. Els materials biodegradables en aquesta última fase ja s'hauran deteriorat i compliran exclusivament una funció de subministrament de nutrients (per exemple, fusta deteriorada, manta orgànica deteriorada).

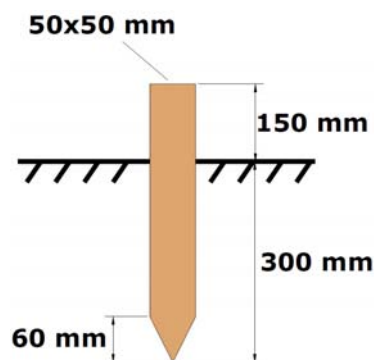
Durant la vida útil d'un treball de bioenginyeria del paisatge, els principals canvis es deuen principalment a dues raons. D'una banda, els materials vegetals inerts utilitzats en l'obra solen ser biodegradables (fusta, troncs, mantes orgàniques, malles orgàniques, biorotlles, etc.) i les seves propietats canvien amb el temps (la resistència mecànica d'aquests materials disminueix). D'altra banda, la vegetació desenvolupa la seva part aèria i subterrània augmentant gradualment les seves capacitats de reforç i estabilització del terreny. Per tant, incorporar i reflectir el component temporal en l'anàlisi i disseny d'una obra de bioenginyeria del paisatge permet generar metodologies de càlcul més realistes i ajustades a aquest tipus d'obres.

Els epígrafs que hi ha a continuació expliquen una metodologia per incorporar les particularitats anteriors en el disseny de treballs de bioenginyeria del paisatge.

## DISCUSSIÓ

### Processos de deteriorament de la fusta

La millor manera d'incorporar el progrés dels processos de deteriorament de la fusta és a partir de la disponibilitat de dades experimentals que podem extrapolar a la nostra situació. Algunes agències de recerca tenen dades sobre la durabilitat natural dels diferents tipus de fusta (per exemple, AITIM) i per a diferents condicions de servei. A més, hi ha experiments (Fig. 1) i informació sobre la vida útil d'algunes estructures de fusta a l'aire lliure (per exemple, pèrgoles, pals de telèfon, tanques, etc.).



*Figura 1 Dimensions de les estakes utilitzades en experiments per analitzar els processos de deterioració i podridura de la fusta en contacte directe amb el sòl (adaptat de Leicester et al., 2003)*

En el cas de les obres de bioenginyeria del paisatge, la fusta està en contacte directe amb el sòl i generalment no es tracta amb compostos químics que milloren la seva durabilitat. En absència de dades experimentals o de dades disponibles en institucions o organismes públics o privats, un mètode possible per caracteritzar l'evolució dels processos de deteriorament de la fusta és el model Leicester et al (2003). A partir de l'experiència acumulada, aquest mètode produeix uns resultats conservadors que

permeten dissenys de la banda de la seguretat. En aquest model, l'equació que expressa el ritme de progrés dels processos de deteriorament de la fusta és la següent:

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

On:

$r$  = taxa d'avanç en els processos de deteriorament de la fusta (mm/any)

$K_{MADERA}$  = coeficient que depèn del tipus de fusta (albeca o duramen) i de la durabilitat natural de les espècies arbòries de les quals procedeix la fusta.

$K_{CLIMA}$  = coeficient que depèn de la precipitació anual mitjana i de la temperatura mitjana anual de la zona on s'utilitzarà la fusta.

Per als coeficients esmentats, a Leicester et al (2003), hi ha dades tabulades i més detall de la seva determinació i càlcul.

Cal assenyalar que la fusta d'albeca es deteriora més ràpid que la de duramen donat que té un contingut d'humitat més elevat. Donada la gamma de diàmetres utilitzats en treballs de bioenginyeria del paisatge (entre 10-30 cm), la presència de fusta juvenil serà important, la qual cosa implica també una major presència de fusta albeca. A causa d'aquesta situació, el valor de  $r$  (mm/any) utilitzat ha de correspondre al de fusta albeca (això també farà obtenir resultats del costat de la seguretat).

D'altra banda, els processos de deteriorament no comencen en el moment de col·locar la fusta en la construcció. El temps transcorregut fins que s'inicien els processos de deteriorament s'anomena temps de retard ( $t_0$ ). En el model Leicester et al (2003), el temps de retard ( $t_0$ ) es calcula a partir de la següent fórmula (Wang et al., 2007):

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

Aquest mètode assumeix que la secció no afectada pels processos de deteriorament manté el valor original de les seves propietats mecàniques. La pèrdua de la secció, des d'un punt de vista mecànic, es pot calcular a partir de l'estimació del valor de la part del diàmetre total afectat pels processos de deteriorament.

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

$d_t$  = profunditat (part del radi) afectada pels processos de deteriorament (mm) després de  $t$  anys (després de la finalització de les obres). La part del diàmetre afectat serà igual a  $2d_t$ .

Partint del valor de  $d_t$  es pot obtenir la força residual mitjançant (Wang et al., 2007):

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

On  $R$  és la resistència residual,  $D$  és el diàmetre inicial de l'element de fusta i  $f_d$  és el valor de resistència a la flexió (que depèn de l'espècie de fusta).

Aquest model assumeix que la vida útil de l'element de fusta (com a element estructural) s'aconsegueix quan la resistència es redueix al 70% del seu valor inicial. Segons la premissa anterior, en el cas d'elements de secció circular de diàmetre inicial  $D$  (mm) sotmès a estressos de flexió, la profunditat ( $d_L$ ) de la part afectada pels processos de deteriorament al final de la seva vida útil serà:

$$d_L = \frac{1}{2} (1 - 0.7^{1/3}) \cdot D$$

On:

$d_L$  = profunditat afectada pels processos de deteriorament al final de la vida del servei de la peça (mm)

$D$  = diàmetre original de la peça (mm)

La vida de servei es calcularà segons (Fig. 2):

$$L = t_0 + \frac{d_L}{r}$$

On:

$L$  = vida de servei de l'element de fusta (anys)

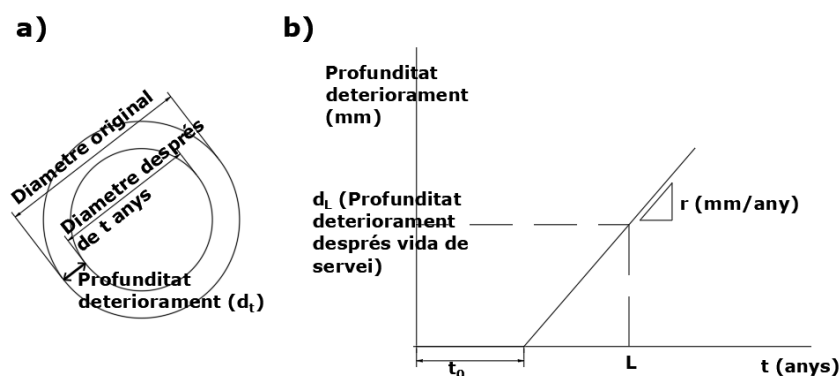


Figura 2 (a) canvis en el diàmetre i la profunditat de deteriorament; b) avanç dels processos de deteriorament que mostren el significat de les variables de model (adaptades de Tardío & Mickovski, 2016)

El model anterior es pot ajustar i arribar a nivells més complexos. Per exemple, es pot obtenir un gràfic de la variació en el ritme de deteriorament per cada tipus de fusta (albeca i duramen) i comprovar si la profunditat afectada després de la vida útil dins de l'àrea de l'albeca o, per contra, entra a la zona duramen. Com s'ha esmentat, atès que la fusta utilitzada en les obres de bioenginyeria del paisatge conté habitualment un alt percentatge de fusta juvenil, el cas anterior és menys freqüent.

Com ja s'ha dit, el model anterior produeix valors conservadors pel que fa al disseny de les obres de bioenginyeria del paisatge. En l'article de Tardío&Mickovski (2016) es mostra una metodologia per al disseny de les obres de bioenginyeria del paisatge incorporant tant els processos de deteriorament de la fusta (segons el model de Leicester et al., 2003) com el desenvolupament del material viu emprat. El reforç assolit a partir d'aquest últim es pot estimar des dels diferents mètodes disponibles (per exemple, Wu et al., 1979; Gray i Leiser, 1983; Schwarz et al., 2010; Tardío & Mickovski, 2015). Una explicació d'aquests models es pot trobar a Norris et al (2008). L'explicació d'aquests mètodes supera l'abast d'aquest article.

### **Metodologia de disseny que incorpora el desenvolupament de la vegetació i els processos de deteriorament dels materials emprats en les obres: el mètode Tardío&Mickovski.**

Una metodologia realista de disseny i càlcul d'una obra de bioenginyeria del paisatge ha de ser capaç d'incloure els processos de canvi dels materials utilitzats (vius i inerts) al llarg de la seva vida útil. Hi ha tres moments diferenciats en el funcionament conjunt d'un treball de bioenginyeria del paisatge:

FASE 1: durant la qual el treball de reforç i estabilització es duen a terme principalment pels materials inerts (naturals i/o manufacturats) utilitzats en l'obra.

FASE 2: durant la qual la vegetació ja ha arribat a un cert desenvolupament però encara no és capaç de desenvolupar les funcions d'estabilització i reforç del terreny per si mateixa. En aquesta etapa, els materials inerts encara han de ser capaços d'assegurar l'estabilitat global del sistema. Hi ha, per tant, una col·laboració en el treball d'estabilització entre materials inerts i el desenvolupament de la vegetació. En aquesta etapa, es planteja que els efectes de reforç de la vegetació s'han de tenir en compte en les comprovacions d'estabilitat externa (a bolcada, a lliscament i capacitat portant) i global, però no es tenen en compte en les comprovacions d'estabilitat interna. El fet de no incloure els efectes de reforç en qualsevol de les comprovacions anteriors estarà en la banda de la seguretat, però evitarà que es contempli l'evolució del paper de reforç de la vegetació.

FASE 3: durant la qual la vegetació ja és el principal agent estabilitzador de la zona d'intervenció. Els materials inerts poden continuar desenvolupant una funció de reforç residual, fins i tot, no sent necessari ja en aquesta etapa.

La informació necessària per avaluar l'estabilitat del sistema en cadascuna de les fases anteriors és la següent:

Fase de la vida de servei del treball de bioenginyeria	Informació necessària per avaluar l'estabilitat del sistema
FASE 1	- Propietats mecàniques originals dels materials inerts (naturals i manufacturats)
FASE 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estimació de les pèrdues de resistència mecànica dels materials inerts utilitzats.</li> <li>- Estimació de les pèrdues de secció mecànica dels elements de fusta de les estructures de bioenginyeria.</li> <li>- Estimació de les possibles pèrdues de pes del conjunt sòl-estructura.</li> <li>- Estimació del creixement de l'aparell radicular de la vegetació.</li> <li>- Estimació de l'increment de les propietats resistents del terreny (estimació del valor de la cohesió addicional deguda a la vegetació)</li> </ul>
FASE 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estimació del creixement radicular de la vegetació.</li> <li>- Estimació de les noves propietats resistents del terreny (estimació del valor de la cohesió addicional degut a la vegetació).</li> </ul>

*Taula 1 fases de la vida de servei d'un treball de bioenginyeria del paisatge i paràmetres a tenir en compte en cadascuna d'elles per realitzar comprovacions d'estabilitat.*

Els materials inerts (vegetals i manufacturats) han de mantenir el sistema estable fins a la fase 3. La profunditat de l'aparell radical (necessari per a l'estimació del reforç a causa de la vegetació) es pot estimar a partir del treball de camp (Böhm, 1979), a partir dels models teòrics de la distribució de l'arrel (Laio et al., 2006; Preti et al., 2010; Tardío et al., 2019) o a partir de l'al·lometria i paràmetres sintètics de les diferents espècies (Cornelini et al., 2008).

La metodologia anterior requereix la definició d'un esquema temporal per a calcular les pèrdues de secció i les pèrdues de propietats mecàniques dels elements de la fusta (o l'element de reforç que s'ha utilitzat). Es proposa el següent esquema de fites temporals (d'acord amb Tardío & Mickovski, 2016):

FASE 1: moment 0. Moment just després de la finalització de les obres.

FASE 2: fites temporals dins de la vida de servei (L) dels elements de fusta calculats segons la metodologia de Leicester et al (2003) i Tardío & Mickovski (2016). Exemples d'aquestes fites de comprovació són: (L/3, 2L/3) o L/2. En el cas d'utilitzar altres materials de reforç inerts (per exemple, la terra reforçada), les fites temporals es definiran a partir de la informació proporcionada pels fabricants. Les comprovacions d'estabilitat es realitzaran en cada fita de temps definida.

FASE 3: En el cas dels elements de fusta, aquesta fase correspondrà al temps en què aquests elements han perdut el 30% de la seva resistència mecànica. És a dir, han arribat al final de la seva vida de servei (L anys). En tots els altres casos, serà el moment en què els diferents materials no mantinguin les seves propietats resistents en funció dels coeficients d'informació i seguretat dels diferents fabricants.

La metodologia anterior (Fig. 3) proporciona un marc general per estructurar el disseny de l'obra, per tant, s'haurà d'adaptar a cada cas. En general, en el cas d'obres d'estabilització i suport al sòl, assegurar l'estabilitat de la zona d'intervenció durant els primers 5 a 10 anys serà suficient per permetre el desenvolupament de la vegetació arbòria i arbustiva. Segons l'esquema anterior, els treballs de contenció es dissenyaran com a obres permanents (no temporals). En el cas de les obres de cobertura, garantir un període de dos a tres anys permetrà un bon desenvolupament de la vegetació herbàcia i/o arbustiva.

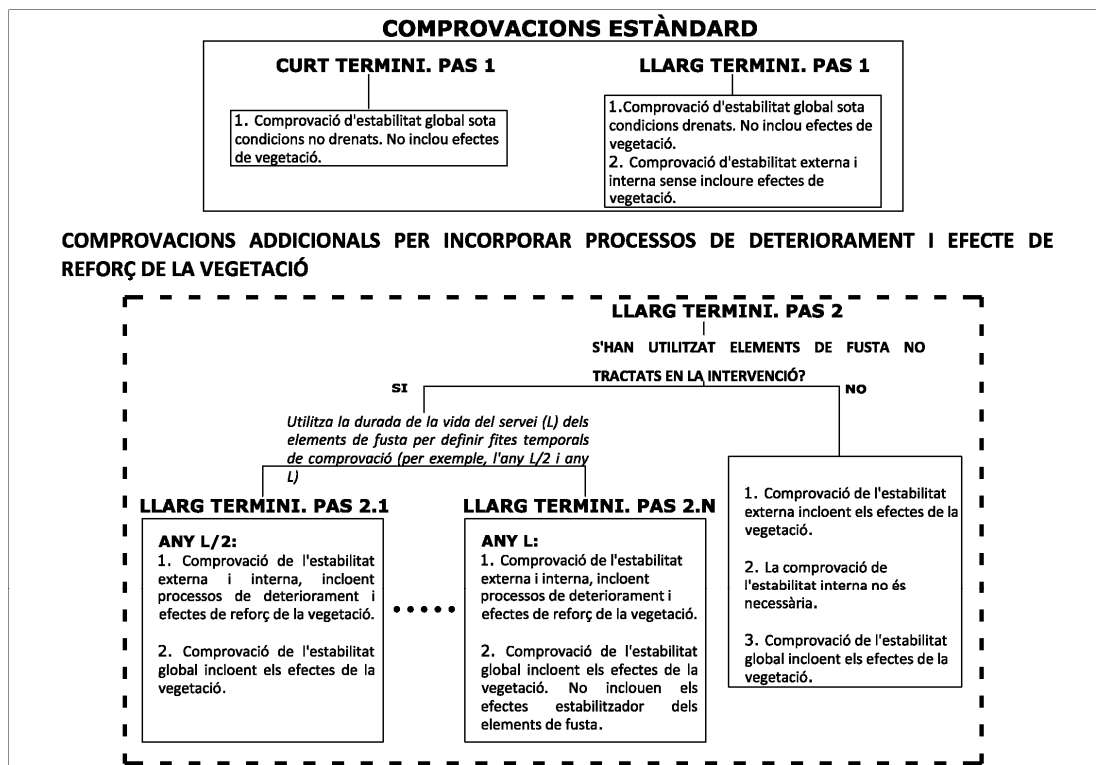


Figura 3 Mètode Tardío & Mickovski. Metodologia de disseny dels treballs de bioenginyeria en el qual s'inclouen els processos de deteriorament dels materials i els efectes de reforç de la vegetació. L'exemple de la figura ha definit una fita a L/2 anys. Dins de la FASE 2, podeu definir altres fites temporals del tipus L/3 i 2L/3.

La comprovació d'estabilitat interna es pot realitzar segons Menegazzi & Palmeri (2013). Es poden realitzar comprovacions d'estabilitat externa i global segons Gray i sotir (1996) o Tardío & Mickovski (2016). Es determinaran els coeficients de majoració de forces i minoració de propietats resistents d'acord amb les diverses normatives existents (p.e. Eurocode 5).

En aquest esquema de disseny cal afegir el manteniment i el treball de seguiment que acompanyen i recullen la informació durant tota la vida del servei de l'obra (Tardío et al., 2019). L'informació recopilada no servirà únicament per a calibrar o corregir alguns aspectes que es detectin, sinó que també permetrà millores dels dissenys en futures obres (permetrà processos de millora permanent i gestió adaptativa de la informació). Exemples de protocols de seguiment d'obres es poden trobar i descarregar a <http://ecomedbio.eu/protocols> (Zaimés et al., 2019).



## CONCLUSIONS

El caràcter dinàmic de les obres de bioenginyeria del paisatge s'ha de reflectir i incorporar a les metodologies de disseny d'aquestes intervencions.

Factors com ara els processos de deteriorament dels materials biodegradables utilitzats i l'evolució dels efectes de reforç de la vegetació s'han d'integrar en el càlcul d'aquest tipus d'obres.

La metodologia proposada captura moments crítics i garanteix el desenvolupament efectiu i la transferència de funcions estabilitzants entre elements inerts i material viu en desenvolupament. També permet reflectir l'evolució del paper estabilitzador de la vegetació.

L'aplicació de la metodologia proposada garanteix donar a la vegetació el temps necessari per acabar convertint-se en la principal font d'estabilitat en l'àrea d'intervenció. També és possible generar processos de millora contínua, calibratge del mètode i ús de la informació generada durant la fase de monitoratge de l'obra.

## BIBLIOGRAFIA

- BÖHM, W., 1979. *Methods of Studying Root Systems*. Springer Verlag, Berlin, pp.275.
- Böll, A., Burri, 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.
- 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., FOLIENSTE, 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. Il dimensionamento delle opere di Ingegneria Naturalistica. Direzione Infrastrutture, Ambiente e Politiche Abitative. 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., LAIO, F., 2010. Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes. *Ecol. Eng.* 36, 305–316.
- R Core Development Team, 2014. R: A
- 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
- TARDIO, 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., 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.
- TRON, S., DANI, A., LAIO, F., PRETI, F., RIDOLFI, L., 2014. Geophysical Research Abstract, Vol. 14. EGU General Assembly, pp. 2012 (EGU2012-10739).
- WANG, C. H., LEICESTER, R. H., FOLIENTE, G. C., NGUYEN, M. N., 2007. Wood service life design guide. Forest and Wood Products Australia Limited. 115 pp.
- WU, T.H., 1976. Investigation of landslides on Prince of Wales Island. Geotechnical Engineering Report 5, Civil Engineering Department, Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.
- ZAIMES, G.N., TARDIO, 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.