

Nota Técnica

Viabilidad de la construcción de diques de tierra mediante técnicas tradicionales en cárcavas de baja escorrentía

**Viability of building rammed-earth check dams
by means of traditional construction techniques in low runoff gullies**

Galicia, S.^{1,3*}; Navarro, J.^{1,3}; Martínez, A.¹; Mongil-Manso,^{1,2,3}; Santibáñez,^{1,4}

¹*Departamento de Ing. Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid. España.*

²*Grupo de Hidrología y Conservación de Aguas y Suelos, Universidad Católica de Ávila. Ávila, España.*

³*Forest, Water and Soil Research Group.*

⁴*Obras con Calma - Adobera del Norte*

Autor para correspondencia: sergiogl_91@yahoo.es

Resumen

Los materiales usados tradicionalmente para diques en restauración hidrológico-forestal provocan un impacto visual permanente. Para conseguir integrar la obra en el paisaje, se propone la construcción de diques de tierra compactada con paramento aguas abajo revegetable, los cuales se construyen con materiales procedentes del propio terreno. Esta construcción en tierra no se ha utilizado en España para corregir cárcavas o torrentes, pero sí para balsas de agua y grandes presas, obras longitudinales contra avenidas y otro tipo de construcciones o edificaciones. En este trabajo se propone una modificación del perfil clásico de los azudes de tierra, para poder reducir el volumen de obra, construyendo un perfil vertical aguas arriba, con un núcleo impermeable basado en la construcción de muros tapiales, y un perfil inclinado aguas abajo y revegetable. El tipo de muro tapial permite usar materiales y métodos constructivos tradicionales de la zona, respetando el medio ambiente, mientras que la revegetación del paramento aguas abajo asegura su integración en el paisaje. La comprobación del dique al vuelco, deslizamiento y resistencia del terreno aseguran su estabilidad y garantía. La comparación del coste de ejecución con el de otros perfiles clásicos (hormigón, mampostería gavionada) muestran la viabilidad de este tipo de obra para la corrección de zonas acarcavadas, en zonas de baja escorrentía y cuencas de materiales finos.

Palabras clave: Tapial, restauración forestal, control de la erosión, impacto ambiental, presas de tierra, bioingeniería.

Abstract

The materials traditionally used for check dams in forest-hydrological restoration produce a permanent visual impact. The aim of this paper is to present a sort of revegetated or 'green' rammed-earth check dam to integrate this construction in the natural landscape, as it is built using materials from the surrounding terrain. This sort of earth construction has not been used in Spain to restore gullies or torrents, but for irrigation pools and large dams. Besides, it has been used in longitudinal works against floods and other constructions or buildings. We propose a modification of the classical profile of the earth dams, in order to reduce the construction volume, by means of a vertical profile upstream, with a waterproof core based on the construction of earthen walls, and a revegetated sloping profile downstream. The rammed-earth wall allows the use of materials and traditional construction methods from the area, environmental friendly, while the revegetated downstream embankment integrates the structure into the landscape. The check dam has been designed to accomplish the conditions against overturning, sliding stability and ground resistance. The construction cost was compared to other classic check dam profile (concrete and gabions), showing the feasibility of this type of structure to restore gullied and low rainfall or runoff areas, as clayey basins.

Keywords: Tapial, forest restoration, sediment control, environmental impact, small earth dams, bioengineering.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Los diques forestales tienen una contrastada eficacia en la retención de sedimentos (Romero *et al.*, 2012; Ramos, 2014). Esta retención se produce durante los primeros años de las restauraciones hidrológico-forestales, cuando la cobertura vegetal aún no es capaz de frenar los fenómenos erosivos (Martínez-Casanovas *et al.*, 2009; Rey, 2003), lo que posibilita la formación de una cuña de sedimentos que disminuye la pendiente del cauce, lamina los caudales y estabiliza las laderas de las cárcavas, impidiendo movimientos en masa, además de crear una importante superficie útil dentro de la cárcava.

Estos diques generalmente están contruidos con hormigón, mampostería hidráulica o gaviones rellenos de cantos de la zona o piedra procedente de cantera. La utilización de estas obras genera un impacto visual durante y después de la restauración, pero su utilización se encuentra plenamente justificada por su necesidad y eficacia en zonas gravemente afectadas por la erosión (*badlands*, torrentes y ramblas). Sus materiales aportan a la construcción una gran resistencia y los diques pueden perdurar más allá del tiempo estimado en su diseño. En muchos casos, la antigüedad de estas obras implica un legado de gran importancia, como muestra del esfuerzo y tesón de nuestros ingenieros de montes predecesores por restaurar el patrimonio natural perdido. En la actualidad estas obras también constituyen focos importantes de la investigación de procesos hidrológicos y erosivos en zonas acarreadas (Romero *et al.*, 2012; Díaz *et al.*, 2014; Navarro *et al.*, 2015; Quiñonero-Rubio *et al.*, 2016; Ramos-Díez *et al.*, 2016).

Si nos fijamos en el ámbito de la construcción de grandes presas de gravedad se observa que frecuentemente se han utilizado también materiales constructivos como la tierra. Esto permite construir en zonas con capacidad portante del terreno baja, pudiéndose abaratar costes cuando la extracción de tierra es cercana a la obra. El núcleo de estas estructuras es de arcilla compactada, mientras que los espaldones están formados por materiales más permeables. Como el destino de estas presas es la retención de agua es necesario dotarlas de drenajes que evacuen controladamente el agua filtrada a través del paramento. Algunos autores, como Suárez (1993) y López Cadenas (1994), ya propusieron trasladar al ámbito forestal de la restauración la construcción de estas presas de tierra, mediante una simplificación de cálculo y estructura debido a que se encuentran en cauces con caudales bajos y dimensionados para periodos de retorno pequeños. Además, estos diques de tierra aplicados para restaurar cárcavas o cauces intermitentes deben soportar periodos de embalsamiento cortos. Pese a su facilidad de construcción, simplicidad de sus cálculos, bajo impacto y facilidad de obtención de materiales no se ha encontrado ninguna referencia de su construcción como dique forestal de retención de sedimentos. Donde sí se han utilizado diques de tierra con características similares ha sido a modo de mota en protección contra inundaciones.

La tierra, sin embargo, ha sido un material muy frecuente en edificación. Apro-

ximadamente un tercio la de la población mundial vive en construcciones de tierra, alcanzando en algunos países en desarrollo más de la mitad de los hogares (Minke, 1994). Este material no se ha utilizado únicamente en la construcción de viviendas, también ha sido utilizada en importantes edificaciones, estimándose que el 20% de los bienes Patrimonio Mundial de la Humanidad están contruidos con tierra (Gandreau & Delboy, 2012). En España la construcción con tierra se encuentra ampliamente distribuida, siendo ampliamente utilizada hasta finales del siglo XIX, cuando fue desplazada por la aparición de nuevos materiales de construcción (Jiménez y Cañas, 2006).

Las diferentes técnicas de construcción en tierra se pueden dividir por el tipo de tratamiento y según la humedad con que debe trabajarse. Aunque existen un gran número de técnicas de construcción con tierra, tradicionalmente las más empleadas en España han sido el adobe y la tapia, con adaptaciones propias de cada zona.

Estas dos técnicas, pese a casi desaparecer, están experimentando un resurgimiento debido a la necesidad de utilizar materiales de bajo impacto, bioclimaticos y sostenibles, con un ciclo productivo circular. Este creciente interés comenzó en Europa a finales de los sesenta con la crisis energética global, cuando diferentes agentes del sector de la construcción e investigación rescataron materiales y técnicas antiguas, tratando de unir las necesidades de la edificación actual con la arquitectura bioclimática (Font & Hidalgo, 2011). Además, este nuevo impulso a la construcción con tierra ha conseguido modernizar las técnicas constructivas adaptándolas a la magnitud y necesidades de los proyectos actuales (Bestraten *et al.*, 2011). La nueva puesta en valor de la construcción con tierra ha traído consigo una mejora en la construcción tradicional del adobe y la tapia, así como la aparición del bloque de tierra comprimida (BTC). Este se basa en comprimir tierra húmeda dentro de un molde, mediante un pistón que presiona la tapa (Houben *et al.*, 1996). La ventaja del BTC es que se construye a modo de los muros de ladrillos. Además, es la única de las técnicas en tierra que, por el momento, posee en España una norma de calidad (UNE 41410:2008) que determina las prestaciones a cumplir y los ensayos a realizar para asegurar sus propiedades. La *Tabla 1* muestra las principales características de los materiales que actualmente se usan en la construcción en tierra.

1.2. *Objetivos y condicionantes*

Ante este panorama, este trabajo pretende comprobar si es posible diseñar un dique de retención en cárcavas de baja escorrentía, utilizando técnicas tradicionales de construcción con tierra, que cumpla las condiciones constructivas y de seguridad de los diques tradicionales de hormigón o gaviones, que disminuya el impacto visual y que suponga una solución integrada y definitiva en el paisaje, sin necesidad de mantenimiento. Para ello se establecen los siguientes condicionantes en primera aproximación:

- Para evitar el riesgo de filtraciones indeseables planteamos que no exista un embalsamiento de agua prolongado en el tiempo. De esta forma se condicio-

na la utilización de este tipo de diques a cárcavas de baja torrencialidad y diseñando un drenaje óptimo.

- La obra se debe diseñar para periodos de retorno (T) bajos (máximo de 20-30 años) tal que durante este periodo la obra quede completamente aterrada.
- La tierra no debe poseer arcillas expansivas que puedan arruinar la obra.
- La obra debe cumplir la condición de núcleo central para evitar zonas a tracción.
- También debe cumplir las condiciones de no vuelco y no deslizamiento.
- El vertido del caudal no puede ser libre, para evitar la erosión o ruina del paramento aguas abajo y de la obra.
- El caudal debe circular por vertederos suficientemente diseñados, tal que no exista riesgo de desbordamiento.
- Debe poseer un correcto drenaje para cualquier nivel de embalsamiento.

2. Metodología

Para el diseño del dique se hizo un análisis previo entre el adobe, el BTC y el muro tapial (*Tabla 1*). También se analizó la geometría del perfil de la obra: paramento aguas arriba y aguas abajo inclinados, vertical aguas arriba-inclinado aguas abajo. Para la realización del cálculo de un dique tipo, se tomó la cárcava estudiada por Galicia (2015) en el Alto de los Castaños en Villantodrigo (Palencia). El caudal de diseño se estimó mediante el método racional de Témez (1991) para $T = 25$ años ($0,433 \text{ m}^3/\text{s}$). El cálculo del vuelco se basó en la condición del núcleo central del tapial de forma que este fuese estable por sí mismo, sin tener en cuenta el peso del paramento de aguas abajo sobre el núcleo. La metodología empleada es la misma que para diques de hormigón de baja densidad. Además, para poder comparar el dique de tierra revegetada con el de hormigón y de gaviones, se realizaron los cálculos para el diseño de estos dos diques con estos materiales bajo las mismas condiciones y lugar. A partir de ello se realizó un análisis económico y de la huella de carbono de cada tipología de dique (Galicia, 2016).

3. Resultados y discusión

Se eligió el tapial como fabrica para su construcción (Galicia, 2016), debido a que este material presenta una adecuada densidad y resistencia (*Tabla 1*). Además,

Tabla 1. Densidad, resistencia y referencia de la que se han obtenido los datos para cada técnica de construcción en tierra y para el hormigón.

Material	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a compresión (N/mm ²)	Referencia
Adobe	1200-1500	0,53 – 1,72	Bauluz & Bárcena (1992)
BTC	1700 – 2000	1 – 5	UNE 41410: 2008
BTC estabilizado	1787 – 2000	10,8	Bioterre (2017)
Tapia	1900 - 2200	3 - 4	Rauch & Kapfinger (2001)
			Bauluz & Bárcena (1992)
			Font & Hidalgo (2009)
Hormigón (HM-20)	2200 – 2300	20	RD 1247/2008

el método constructivo del tapial es similar a la construcción con hormigón, y ya que el material se encuentra próximo a la obra se minimizan los gastos de transporte.

En cuanto a la geometría del perfil se optó por un paramento aguas arriba vertical, ya que, al ser un dique de retención, los sedimentos atrapados prácticamente pasan a formar parte del cuerpo de obra; y un paramento aguas abajo inclinado, formado por tierra revegetable que recubre el núcleo y permite la revegetación e integración paisajística (*Figura 1*).

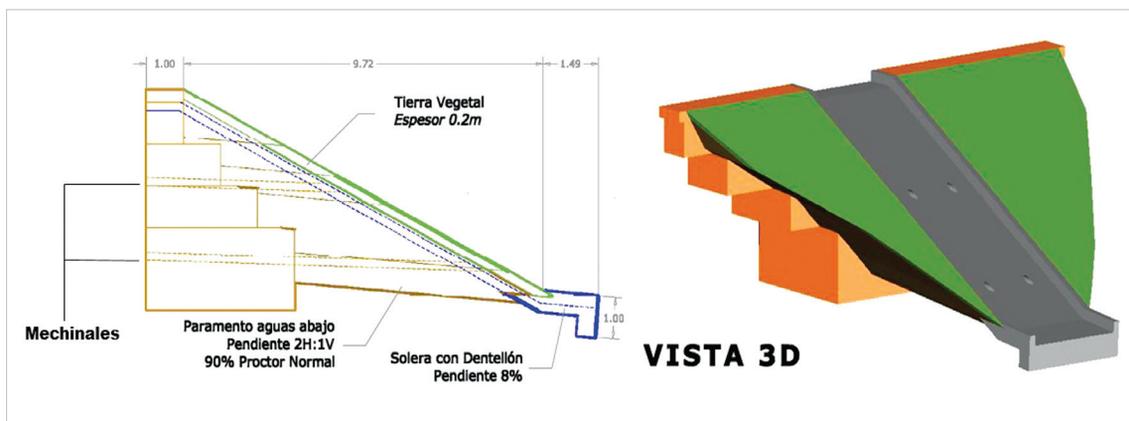


Figura 1. Perfil y vista general del dique.

El vertedero se realizará mediante un colchón de gaviones recibidos en cemento. El vertedero posee suficiente anchura para laminar el caudal, que no produzca inestabilidades, y que, prolongándolo a lo largo de todo el paramento de aguas abajo, con un perfil hidrodinámico, conduzca el agua controladamente hasta la parte inferior del dique, donde se sitúa una solera y dos muros cajeros. Estos impiden la socavación del lecho aguas arriba o de los laterales del cauce, evitando la ruina de la obra. Además, para evitar que el agua quede embalsada en el trasdós del dique, se diseñan una serie de mechinales que atraviesan el perfil longitudinal del

dique a diferentes alturas, desde el paramento de aguas arriba hasta el canal del veredero. Estos mechinales de PVC corrugado son instalados en la obra durante el proceso de construcción.

El paramento de aguas abajo se compondrá de tierra de la zona con una inclinación máxima de 2H:1V (Suárez, 1993) y se compactará a un 90% de Proctor normal. Sobre esta tierra se extenderá una capa de tierra vegetal de 20 cm sobre la que se realizará una hidrosiembra con instalación de mantas orgánicas. El diseño final se muestra en la *Figura 1*.

Posteriormente se realizaron los cálculos para los diques de hormigón y de gaviones, cuyos perfiles se observan en la *Figura 2*. En cuanto al análisis económico, el dique de tapia diseñado tiene un coste de 19.878,69 €, mientras que el dique de gaviones tendría un coste de 11.017,84 € y el de hormigón de 13.767,54 €. Con estos datos podemos ver que el dique de tapia sería un 80% más caro que el de gaviones y un 44% que el de hormigón. Una de las razones de este encarecimiento es que el dique de tapia tiene un proceso constructivo más complejo que los tradicionales, por lo que precisa de un mayor número de unidades de obra. Además, el precio del metro cúbico de tapia es claramente superior al del gavión y hormigón. Este hecho unido a que el dique se encuentra algo sobredimensionado para estar del lado de la seguridad, puesto que es el primer modelo diseñado y con posibilidad de ejecución, nos permite pensar que el precio de construcción podría reducirse significativamente.

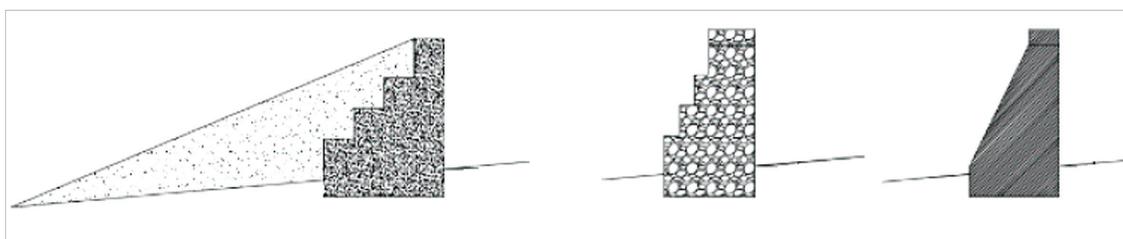


Figura 2. Perfil del dique de tierra, gaviones y hormigón.

Si atendemos a las emisiones de carbono, las estimaciones realizadas muestran que la construcción del dique de hormigón emite 36.818,47 kgCO₂ ya que el hormigón es un material con una huella de carbono muy alta. El dique de gaviones emite 1.025,15 kgCO₂ y el de tapia emite 4.894,04 kgCO₂ este dato es más alto que el dique de gaviones debido a que los tubos de PVC tienen una gran huella de carbono, aunque este dique al tener una hidrosiembra proyectada tiene un efecto sumidero de 23.639,36 kgCO₂, con lo cual el balance de carbono de este dique es negativo.

Este trabajo supone una primera aproximación a la construcción de diques de tierra para el control de sedimentos, por lo tanto necesario seguir profundizando en las características de los materiales que lo componen, realizando diferentes tipos de ensayos a pequeña y mediana escala, de esta forma se podrían realizar simulaciones en programas complejos de cálculo estructural, lo que supondría optimizar el

uso de los materiales ante las diferentes fuerzas, dando lugar a un perfil del dique mejor desarrollado y económico. También sería conveniente realizar un dique piloto para comprobar su correcto funcionamiento a escala real, permitiendo realizar un seguimiento y evaluación permanente del estado del dique en diferentes situaciones (Galicia, 2016).

4. Conclusiones

Los diques de tierra suponen una alternativa viable y real a los diques de retención de sedimentos de hormigón y gaviones, permitiendo la corrección de cárcavas de baja escorrentía, mediante técnicas totalmente integradas en el medio y que causan un impacto visual mucho menor. La adaptación de los diques de tierra de grandes presas, a menor escala, utilizando técnicas tradicionales de construcción en tierra supone una reducción importante del volumen de obra. El uso de técnicas tradicionales de construcción en tierra supone un modo de conservación del acervo cultural de las zonas rurales, que contribuye a la protección de su paisaje característico. La construcción de diques de tierra supone la creación de infraestructuras contra la erosión, que a su vez actúan como sumideros de carbono, y permite cerrar el ciclo de los materiales que en él se utilizan.

5. Bibliografía

- Bauluz, G.; Bárcena, P.; (1992): *Bases para el diseño y construcción con tapial*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid.
- Bestraten, S.; Hormías, E.; Altemir, A.; (2011). Earthen construction in the 21st century. *Informes de la Construcción*, 63: 5-20. <https://doi.org/10.3989/ic.10.046>
- Bioterre. (2017). Ficha técnica del BTC. Disponible en <http://www.bioterre.es/> a fecha de 18 de abril de 2017.
- Díaz, V.; Mongil, J.; Navarro, J.; (2014). Topographical surveying for improved assessment of sediment retention in check dams applied to a Mediterranean badlands restoration site (Central Spain). *Journal of Soil and Sediments*, 14: 2045-2056. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0958-5>
- Font, F.; Hidalgo, P.; (2011). Rammed earth in Spain: current techniques and examples. *Informes de la Construcción*, 63: 21-34. <https://doi.org/10.3989/ic.10.015>
- Galicia, S.; (2015). *Proyecto de restauración hidrológico forestal de la cárcava nº 1 del Alto de los Castaños en la localidad de Villantodrigo (Palencia)*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Palencia.
- Galicia, S.; (2016). *Estudio de viabilidad de la construcción de diques de tierra mediante técnicas tradicionales en cárcavas de baja escorrentía*. Trabajo Fin de Máster Ingeniería de Montes. E.T.S. de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Palencia.

- Gandreau, D.; Delvoy, L.; (2012). *Inventory of earthen architecture*. UNESCO, en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002170/217020e.pdf> a fecha de 18 de abril de 2018.
- Houben, H.; Rigassi, V.; Gamier, P.; (1996). *Blocs de terre comprimée: équipement de production*. CRA Terre- EAG. Bruselles.
- Jiménez, M.C.; Cañas, I.; (2006). Earth building in Spain. *Construcción and Building Materials*, 20: 679 – 690. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.006>
- López Cadenas de Llano, F.; (Director) (1994). *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. TRAGSA. TRAGSATEC. Mundiprensa. Madrid.
- Martínez-Casasnovas, J.A.; Ramos, M.C.; García-Hernández, D. (2009). Effects of landuse changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedés región (Northeast Spain). *Earth Surf. Process. Landforms*, 34: 1927–1937. <https://doi.org/10.1002/esp.1870>
- Minke, G.; (1994). *Manual de construcción en tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Fin de siglo. Montevideo.
- Navarro, J.; Araújo, J.C.; Mongil, J.; (2015). Assessment of 80 years of ancient-badlands restoration in Saldaña, Spain. *Earth surface processes and landforms*, 39: 1563-1575. <https://doi.org/10.1002/esp.3541>
- Quiñonero-Rubio, J.M.; Nadeu, E.; Boiz-Fayos, C.; De Vente, J.; (2016). Evaluation of the effectiveness of forest restoration and check-dams to reduce catchment sediment yield. *Land degradation & development*, 27: 1018 -1031. <https://doi.org/10.1002/ldr.2331>
- Ramos, I.; (2014). *Eficacia de los diques forestales en el control erosivo en cárcavas corregidas durante las restauraciones del siglo XX en los términos municipales de Saldaña y Lobera de la Vega (Palencia)*. Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Montes. Escuela Técnica Superior de Ingenierías. Agrarias. Universidad de Valladolid. Palencia.
- Ramos-Díez, I.; Navarro-Hevia, J.; San Martín-Fernández, R.; Díaz-Gutiérrez, V.; Mongil-Manso, J.; (2016). Analysis of methods to determine the sediment retained by check dams and to estimate erosion rates in badlands. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188: 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5408-y>
- Rauch, M.; Kapfinger, O.; (2001). *Rammed Earth, Lehm un Architektur*. Birkhäuser. Basel.
- REY, F.; (2003). Influence of vegetation distribution on sediment yield in forested marly gullies. *Catena*, 50: 549-562. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00121-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00121-2)
- Romero, A.; Marín, P.; Ortiz, R.; (2012). Loss of soil fertility estimated from sediment trapped in check dams. South-eastern Spain. *Catena*, 99: 42-53. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.07.006>
- Rohmer E.; (1990) *Oficios, materiales y futuro en la arquitectura del adobe*. *Actas de las jornadas de Arquitectura popular española, 1-5 diciembre 1987*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- Suárez, L.M.; (1993). *Presas de corrección de torrentes y retención de sedimentos*. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. República de Venezuela. Caracas.
- Témez, J.R.; (1987). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. MOPU. Dirección General de Carreteras. Madrid.

