

TÍTULO DEL TRABAJO

EXPERIENCIAS OBTENIDAS EN LA APLICACIÓN DE DISTINTAS TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA EN VARIAS ACTUACIONES EN EL MARCO DE LA ESTRATEGIA NACIONAL DE RESTAURACIÓN DE RÍOS.

AUTORES

Sánchez Martínez, Francisco Javier, García Díaz, José, Aparicio Martín, Mónica

Subdirección General de Gestión Integrada del Dominio Público Hidráulico, Dirección General del Agua, MAGRAMA

González Sánchez, Marta, Hernanz Sánchez, Miguel, García-Guijas Redondo, José Manuel y Saiz de la Hoya Zamacola, Alfonso

Gerencia Control de Actuaciones Medioambientales, Dirección Técnica de Tragsa.

RESUMEN DEL TRABAJO

Las técnicas de bioingeniería constituyen una de las herramientas que se están empleando para estabilizar determinadas zonas de cursos de ríos afectadas por erosión, de forma compatible con la mejora de su estado ecológico tal como exige la Directiva Marco del Agua. Estas técnicas se han desarrollado principalmente en países de Centro-Europa como Austria, Suiza, Alemania, y en menor medida Francia e Italia. En España hasta los últimos años eran escasos los proyectos en esta línea y no existía información contrastada acerca de técnicas y materiales idóneos para cada ámbito territorial.

El Proyecto de I+D+i de optimización de técnicas de bioingeniería para la mejora del estado ecológico y estabilización de los márgenes de los ríos, que se enmarca dentro de la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos que está desarrollando el MAGRAMA, ha pretendido contribuir a la mejora del conocimiento de estas técnicas evaluando su eficacia mediante diferentes protocolos de seguimiento.

Se han ejecutado diversas técnicas en escenarios de siete Confederaciones Hidrográficas (Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana, Segura, Júcar y Ebro), de manera que los resultados ayuden a definir la idoneidad de las técnicas para distintos condicionantes y objetivos. Las técnicas ensayadas han sido muy variadas y cabe destacar la construcción de fajinas, instalación de geomallas y mantas orgánicas, construcción de muros Krainer, entramados vivos, instalación de rollos estructurados, etc.

El objetivo de esta comunicación es presentar las experiencias, las metodologías y los primeros resultados del seguimiento de las actuaciones ejecutadas.

Palabras clave: (5 palabras máximo)

Bioingeniería, ríos, rollos, fajinas, Krainer.

TEXTO COMPLETO DEL TRABAJO

1.- INTRODUCCIÓN

En 2006, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino inicia la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos (ENRR) con el objetivo de alcanzar el buen estado ecológico de los ríos, minimizar los riesgos de inundación, potenciar su patrimonio cultural, fomentar el uso racional del espacio fluvial e impulsar el desarrollo sostenible del medio rural dando cumplimiento a la Directiva Marco del Agua y la Directiva de Evaluación y Gestión de los Riesgos de Inundación.

En 2009, en el marco de la ENRR se decide ejecutar un proyecto de I+D+i de optimización de técnicas de bioingeniería con el objetivo principal de determinar si la bioingeniería es aplicable en los cursos de agua mediterráneos y si las especies vegetales que se utilizan, permiten la adaptación a épocas de estiaje y a las perturbaciones derivadas de los agentes climáticos propios de estos cauces. Hasta ese momento, en España eran escasos los proyectos en esta línea mientras que se tiene constancia de su efectividad en países de Centro Europa o en el ámbito fluvial.

También se pretende profundizar en los criterios de diseño para seleccionar la técnica más adecuada para cada problemática y ámbito geográfico, establecer indicadores de seguimiento eficaces y objetivamente verificables para evaluar el grado de viabilidad de las técnicas y una vez finalizado el seguimiento, divulgar los resultados y conclusiones que establecerán posibilidades de aplicación a nivel regional o nacional.

Se han seleccionado quince tramos de aplicación en siete Confederaciones Hidrográficas con problemas de erosión pero cuyas causas y condiciones climáticas e hidrológicas son muy diferentes. Las técnicas se han empleado individualmente o combinadas al objeto de maximizar la eficacia de la intervención.



Figura 1. Mapa de distribución de actuaciones.

Confederación Hidrográfica	Provincia	Términos municipales	Cauce	Técnicas ensayadas								
				Plantación	Estaquillado	Fajina	Red o manta orgánica	Muro Krainer o empalizada de defensa reforzada	Empalizada o entramado vivo	Gavión	Biorrollo	Protección con material vegetal
Miño-Sil	Pontevedra	O'Rosal y Oia	Río Tamuxe									
	León	Cacabelos	Arroyo Vega del Rey									
		Torre del Bierzo	Río Boeza									
Duero	Ávila	La Hija de Dios	Arroyo de La Hija de Dios									
Tajo	Guadalajara	Riba de Saelices	Río Linares									
	Cáceres	Fresnedoso de Ibor y Castañar de Ibor	Río Ibor									
	Ávila	Candeleda	Garganta de Chilla									
Gadiana	Ciudad Real	Fernán Caballero	Río Bañuelos									
		Porzuna	Arroyo Piedra Lá									
Segura	Murcia	Cieza	Río Segura									
Júcar	Teruel	Libros	Río Turia									
		Villastar	Río Turia									
Ebro	Zaragoza	Monterde y Cimballa	Río Piedra									
		Sabiñán	Río Jalón									
	Huesca	Fiscal	Río Ara									

Tabla 1. Distribución de actuaciones y técnicas empleadas.

El estudio se ha realizado considerando dos aspectos; la resistencia estructural que confiere estabilidad al talud, desde su ejecución hasta la degradación de los materiales que se han empleado, y el desarrollo de la vegetación que supone la recuperación de la vegetación de ribera y la creación de nuevos hábitats.

En el seguimiento de las actuaciones se han diferenciado dos partes, la toma de datos en campo y el trabajo de gabinete.

En campo, se ha evaluado la evolución del estado ecológico de los tramos fluviales mediante el uso de diversos índices, se ha observado el desarrollo de la vegetación y los daños presentes en las estructuras ejecutas.

El trabajo de gabinete ha consistido principalmente en la recopilación de datos de avenidas y de caudales medios diarios; elaboración de modelos hidráulicos que muestran velocidades, caudales y las máximas tensiones soportadas por las técnicas, y modelos geotécnicos que permiten dimensionar correctamente la técnica de bioingeniería indicada para cada talud.

Tipo de seguimiento		Datos registrados	Origen del dato	Objetivo del dato
Datos de campo	Seguimiento anual	Temperatura media	Datos recogidos a partir registros climatológicos, como series anuales o de regímenes climáticos	Seleccionar especies con mejor adaptabilidad
		Humedad del terreno	Mediciones en campo	
		Distancia a la lámina de agua	Mediciones en campo y a partir de modelos	Establecer bandas de vegetación
		Grado de brotación	Observación en campo	Seleccionar especies con mejor adaptabilidad
		Crecimiento	Observación en campo	
		Grado de erosión	Observación en campo	Establecer velocidad, tensión y condiciones a partir de cuales empieza a fallar cada técnica
Datos de gabinete	Avenidas extraordinarias	Caudal y Periodo de retorno	Caudales: estaciones de aforos, estudios hidrológicos, o cálculos a partir de calados medidos en campo. Periodo de retorno: comparaciones con las distribuciones normales de los datos forónomicos	Generar los modelos hidráulicos
		Calados	Modelización hidráulica	Establecer calados de diseño para las técnicas de bioingeniería
		Velocidad de la corriente		Asociar velocidad máxima de corriente a cada técnica
		Tensiones tangenciales generadas por la corriente sobre lecho y taludes		Asociar tensión máxima de corriente a cada técnica
		Variación de la geometría	Sucesivos levantamientos topográficos	Estudiar el balance de sedimentos y comprobar la afeción que pueden tener las técnicas de bioingeniería en el mismo
		Tamaño de árido lavado	A partir de las velocidades presentadas en modelos matemáticos y datos de campo	Testear el ábaco de Shields y establecer condiciones de diseño en las técnicas de bioingeniería

Tipo de seguimiento		Datos registrados	Origen del dato	Objetivo del dato
	Régimen de caudales ordinarios	Caudales medios, mínimos y máximos mensuales	Caudales: estaciones de aforos, estudios hidrológicos, o cálculos a partir de calados medidos en campo	Generar los modelos hidráulicos
		Calados asociados a caudales medios mínimos y máximos mensuales	Modelización hidráulica	Establecer bandas de vegetación
		Factor de seguridad	A través de los modelos matemáticos de estabilidad de taludes	Establecer que resistencia estructural de cada técnica

Tabla 2. Datos registrados en el seguimiento, origen y objetivo.

2.- DESARROLLO

En el tiempo transcurrido desde la ejecución de las técnicas, se han realizado diversos estudios y seguimientos cuyos resultados se muestran a continuación.

2.1. Evaluación del estado ecológico de las actuaciones

Se ha evaluado la mejora del estado ecológico de los tramos fluviales intervenidos comparando el resultado de índices físico-químicos, biológicos e hidromorfológicos realizados antes y después de la ejecución de las técnicas de bioingeniería.

A continuación se muestra la clasificación del estado ecológico de las actuaciones de acuerdo con la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH):

CAUCE	ESTADO ECOLÓGICO	
	ANTES DE LA EJECUCIÓN	DESPUÉS DE LA EJECUCIÓN
RÍO TAMUXE	MODERADO	MODERADO
ARROYO VEGA DEL REY	BUENO	MODERADO
RÍO BOEZA	MODERADO	MODERADO
GARGANTA DE CHILLA	MODERADO	MODERADO
ARROYO HIJA DE DIOS	MODERADO	MODERADO
RÍO IBOR	MODERADO	MODERADO
RÍO LINARES	BUENO	MODERADO
RÍO TURIA (Libros)	MODERADO	MODERADO
RÍO TURIA (Villastar)	DEFICIENTE	DEFICIENTE
RÍO SEGURA	BUENO	BUENO
ARROYO PIEDRA LÁ	DEFICIENTE	MODERADO
RÍO BAÑUELOS	DEFICIENTE	DEFICIENTE
RÍO ARA	BUENO	BUENO
RÍO JALÓN	MODERADO	MODERADO
RÍO PIEDRA	MODERADO	MODERADO

Tabla 3. Datos registrados en el seguimiento, origen y objetivo.

En las actuaciones de los cauces de arroyo de Vega del Rey y río Linares se ha detectado que el estado ecológico posterior ha empeorado. Esto es

debido a que los índices físico-químicos no han alcanzado los mínimos exigidos y por tanto, no se tienen en cuenta los resultados del resto de índices.

En los siguientes gráficos se observa el nº de actuaciones por estado ecológico antes y después de ejecutar las técnicas para los índices biológicos e hidromorfológicos. Se puede apreciar que la mayor parte de las actuaciones se encuentran entre un estado muy bueno y bueno.

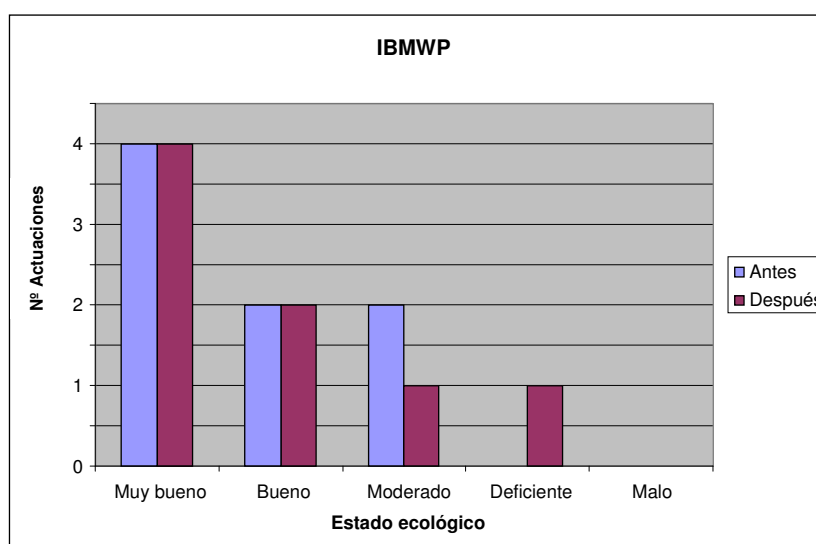


Gráfico 1. Evolución del nº actuaciones por estado ecológico según IBMWP.

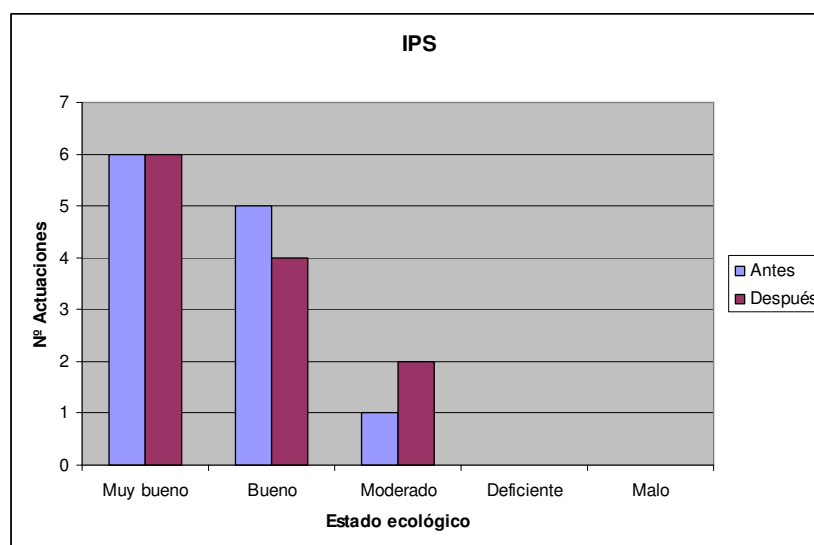


Gráfico 2. Evolución del nº actuaciones por estado ecológico según IPS.

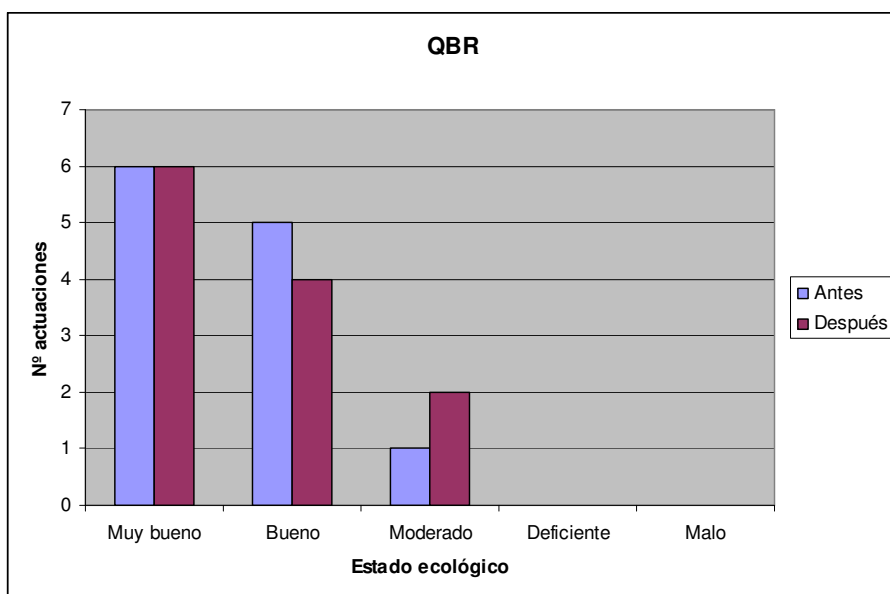


Gráfico 3. Evolución del nº actuaciones por estado ecológico según QBR.

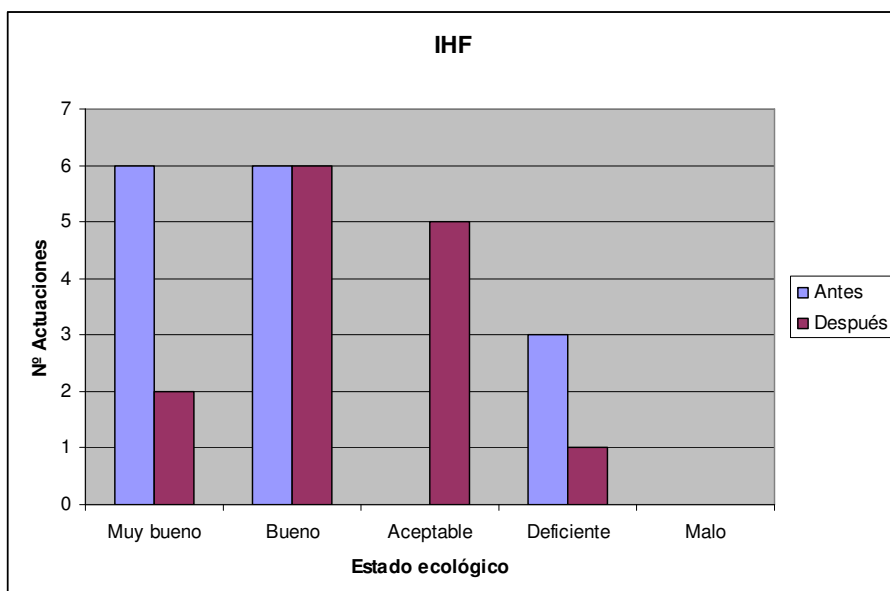


Gráfico 4. Evolución del nº actuaciones por estado ecológico según IHF.

En el análisis de la evolución del Índice de Hábitat Fluvial (IHF) destaca la disminución drástica de nº de actuaciones con estado muy bueno aumentando el nº de actuaciones con estado aceptable. Este descenso es

debido a que las obras generan perturbaciones puntuales sobre los hábitats presentes en el tramo intervenido.

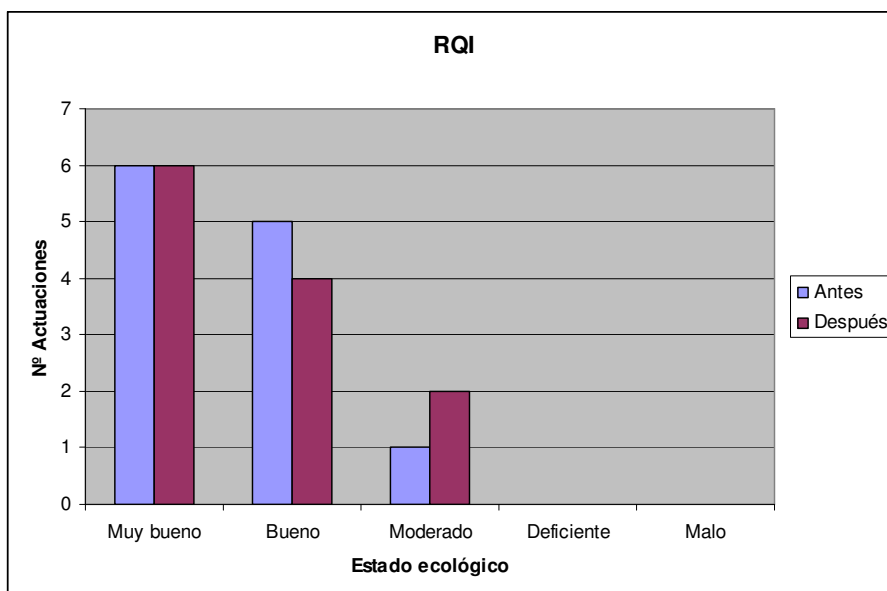


Gráfico 5. Evolución del nº actuaciones por estado ecológico según RQI.

2.2. Eficacia de las técnicas ensayadas

Se han realizado dos seguimientos, uno a los dos meses de finalizar la ejecución de las obras (Seguimiento 1) y otro, un año después de la finalización de las obras (Seguimiento 2). En estos seguimientos se han observado los siguientes resultados:

- Plantaciones de especies leñosas arbóreas o arbustivas

Se ha constatado un mayor porcentaje de marras en las actuaciones en las que las plantaciones cuya distancia vertical a la lámina de agua es superior a 2 m. Por otra parte, los cerramientos cinagéticos y el apoyo con riegos estivales en el primer año han permitido obtener mejores resultados de supervivencia de planta.

El siguiente gráfico muestra los resultados obtenidos:

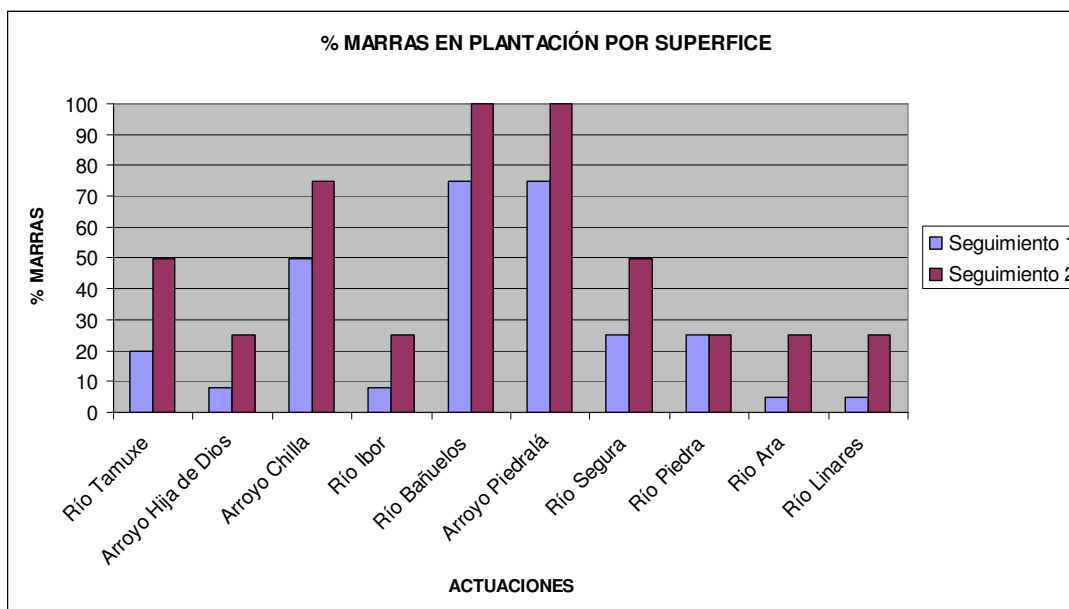


Gráfico 6. Porcentaje de marras en plantación en los seguimientos 1 y 2.

- Estaquillado

En el caso de estaquillados con diferentes especies forestales, se ha constatado que la distancia a la lámina de agua es el principal factor que ha condicionado su supervivencia, tal y como indican los resultados obtenidos en el muestreo realizado tras la primera época estival. Se ha observado que, como norma general, cuando la distancia vertical a la lámina de agua supera 1 m, la supervivencia disminuye considerablemente, como puede verse en el siguiente gráfico.

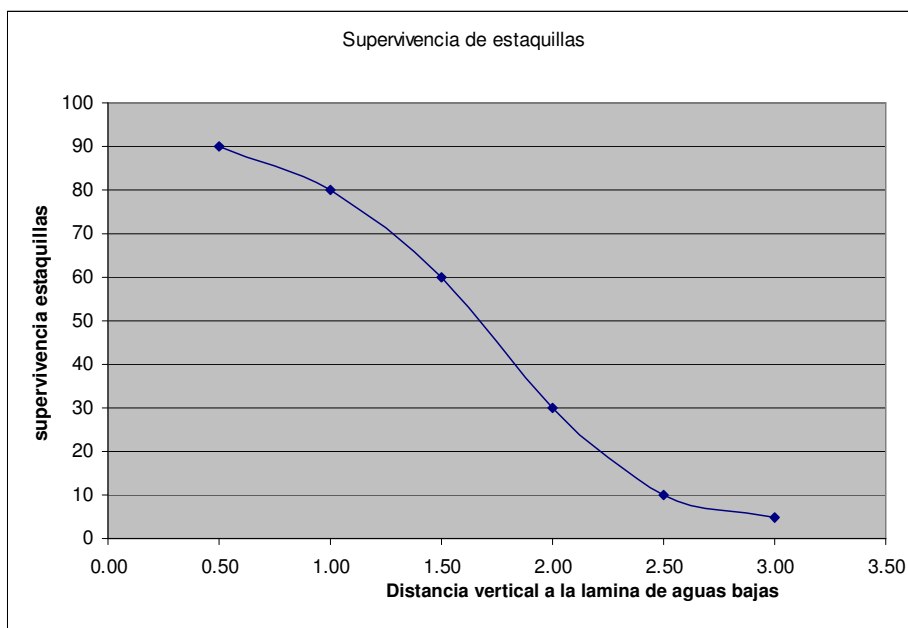


Gráfico 8. Supervivencia de estaquillas respecto a su distancia vertical a la lámina de aguas bajas.

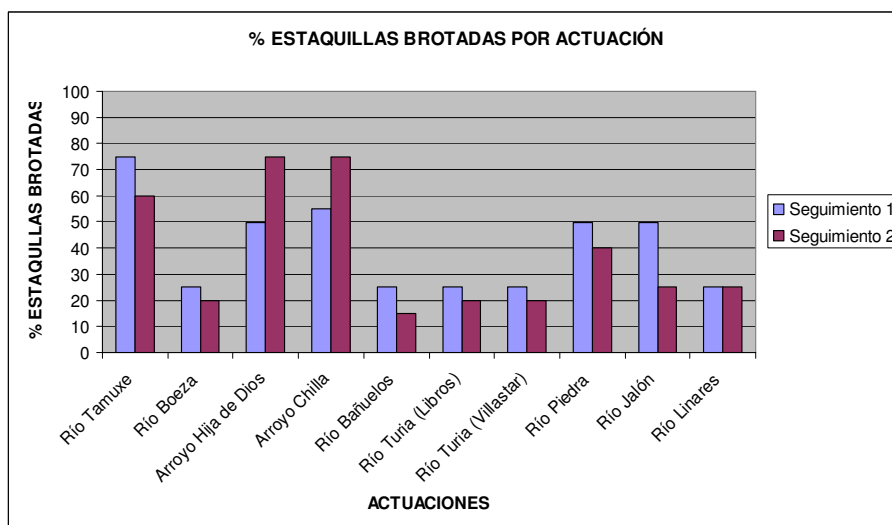


Gráfico 9. Porcentaje de estaquillas brotadas en los seguimientos 1 y 2.

En cuanto al tamaño de las estaquillas, el diámetro que mejor ha funcionado es el comprendido entre 4 cm y 10 cm, con longitud superior a 80 cm, y siempre clavadas al menos 2/3 de aquella. Un diámetro mayor de 6 cm, facilita su clavado en el terreno. Con la densidad de estaquillado empleada de 4 uds/m² se ha observado una importante labor de consolidación del terreno.

- Construcción de fajinas

El desarrollo de la vegetación en esta técnica ha sido superior al 40 % excepto en las actuaciones del río Tamuxe y arroyo Vega del rey en los que un incorrecto diseño de la técnica ha generado que el relleno del trasdós se lavase propiciando una brotación muy escasa.

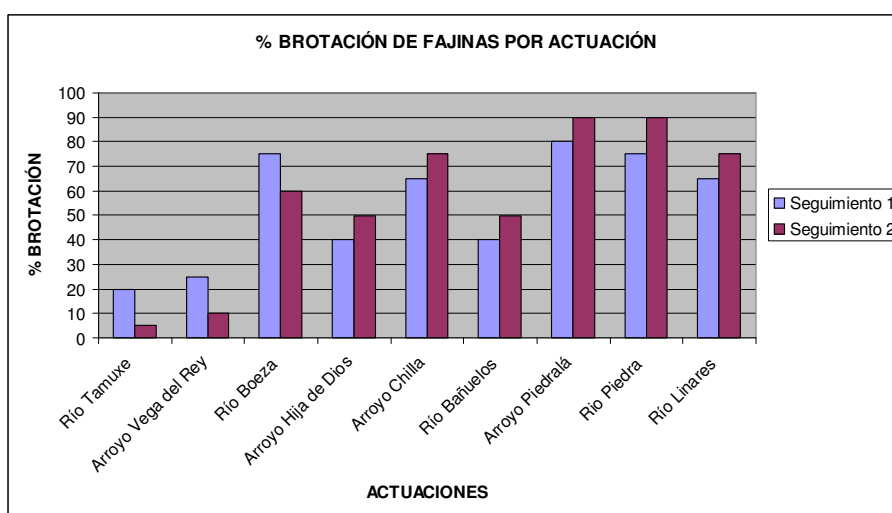


Gráfico 10. Porcentaje de fajinas brotadas en los seguimientos 1 y 2.

- Construcción de empalizada o entramado vivo

Las empalizadas o entramados vivos se han empleado para estabilizar taludes que estuvieran próximos caminos o pequeñas infraestructuras. En este contexto, han cumplido satisfactoriamente el objetivo buscado a corto plazo, si bien la brotación de esta técnica no es tan alta como en otras, por lo que pudiera verse comprometida la estabilidad de la estructura cuando la madera se degrade. Tras el estudio de diferentes experiencias recopiladas, se estima que si no se supera al menos el 30% de brotación no se asegura la revegetación del talud ni por tanto la estabilidad del mismo a largo plazo.

En los siguientes gráficos se pueden observar los porcentajes de estaquillas brotadas y de cobertura herbácea del talud en el que se ha ejecutado un entramado vivo.

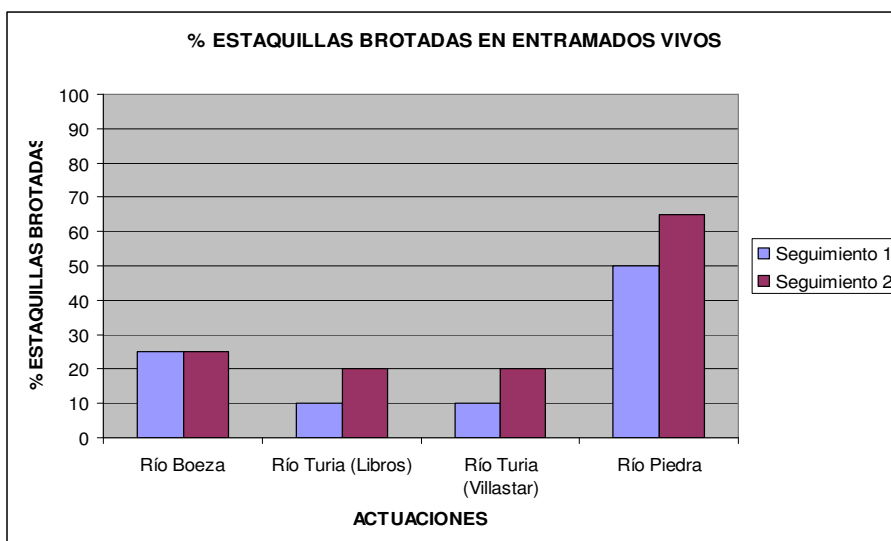


Gráfico 11. Porcentaje de fajas brotadas en los seguimientos 1 y 2.

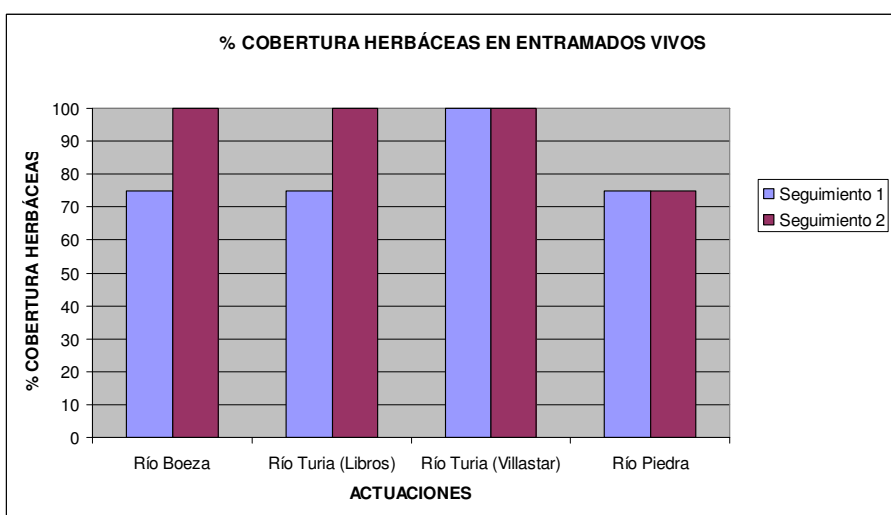


Gráfico 12. Porcentaje de cobertura herbácea en los seguimientos 1 y 2.

- Red o manta orgánica

Han dado muy buen resultado para taludes menores de 45°, pues a partir de esta inclinación la geomalla se ha visto sometida a tensiones de tracción que no ha soportado, como es el caso del río Bañuelos donde, con

desarrollos de talud superiores a los 2 m y una inclinación media de 50°, se han observado graves desperfectos.

El gráfico que se muestra a continuación refleja los porcentajes de superficie alterada observados en las diferentes actuaciones.

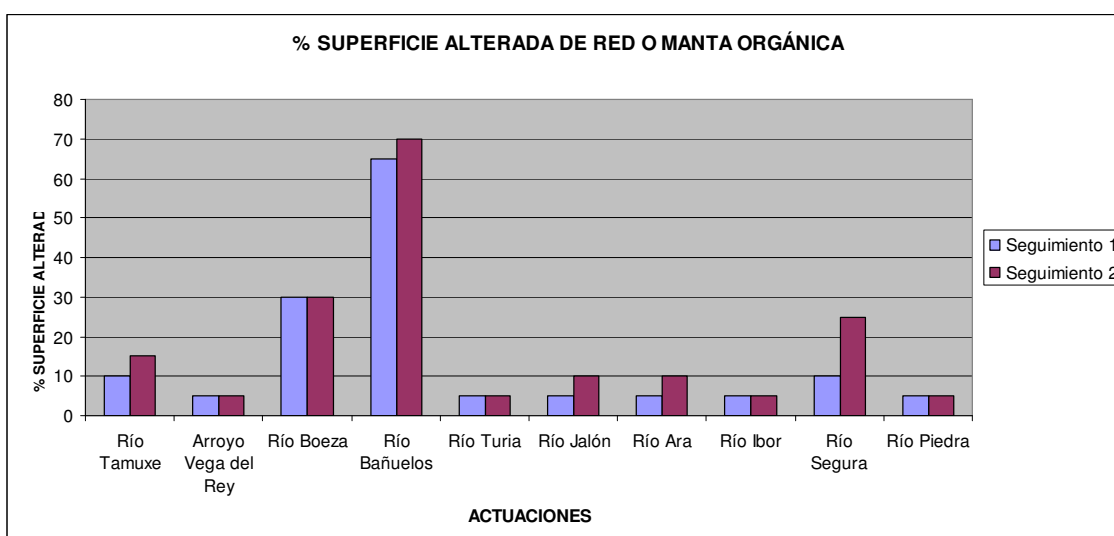


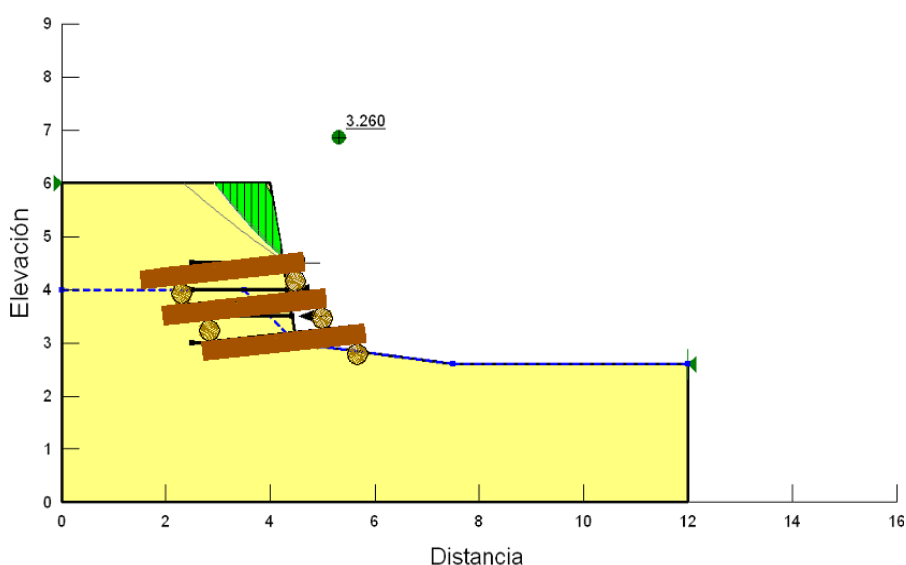
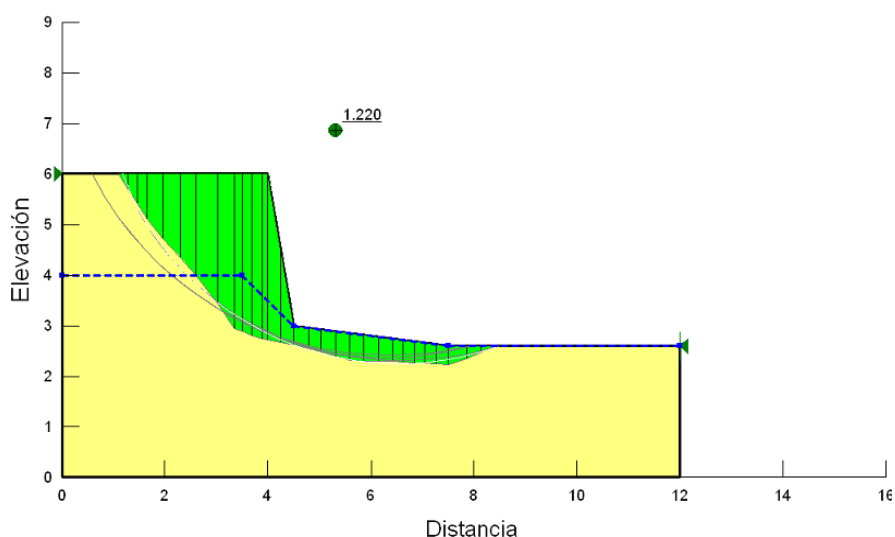
Gráfico 13. Porcentaje de superficie alterada en los seguimientos 1 y 2.

Asimismo se han observado buenos resultados en las actuaciones del río Ibor y río Piedra, en las que se dispuso la red o manta orgánica en bandas paralelas al cauce.

- Muro Krainer o empalizada de defensa reforzada

La empalizada de defensa reforzada ha resultado ser una técnica muy eficiente, desde el punto de vista estructural, siendo su comportamiento comparable al de un muro de tierra reforzada, en que los troncos confieren la rigidez necesaria al talud para hacerlo estable, anclando la parte potencialmente deslizable del mismo. La empalizada de defensa reforzada eleva los coeficientes de seguridad del talud considerablemente, como se puede apreciar en las figuras siguientes, resultado de una modelación geotécnica. El círculo de deslizamiento sin empalizada es muy superior al

que presentaría el talud con la técnica ejecutada, presentando además un factor de seguridad mucho menor, 1,220 en el primer caso y 3,260 en el segundo.



Figuras 2 y 3. Salidas de los modelos geotécnicos, donde se aprecia como afecta la empalizada sobre la superficie de deslizamiento y sobre el coeficiente de seguridad

En las empalizadas de defensa reforzadas, los procesos erosivos provocados por la corriente de agua, por si solos no son capaces de desplazar ni dañar los troncos, pero sí pueden lavar el material en que está embebida la estructura, así como el terreno en que se cimenta. Por este

motivo, tanto el posible lavado del terreno, como el socavamiento o fallo del pie de talud, son factores limitantes de la estructura.

Para las empalizadas de defensa reforzada realizadas en el presente proyecto, se han tomado las siguientes precauciones obteniéndose buenos resultados:

- Inclinarse los pisos de la estructura 15° en el extremo en contacto con el agua, hacia arriba. De esta manera se mejora la estabilidad del material entre los pisos de la empalizada.
- Protección del pie con escollera o gavión flexible.
- Machihembrado en los apoyos de los troncos, con lo que se disminuye la superficie expuesta al paso de la corriente.
- Estaquillado y/o plantación entre los diferentes pisos de la estructura, asegurando de este modo la estabilidad una vez se degrade la técnica, y mejorando la cohesión del material empleado por medio del sistema radicular que desarrollan.

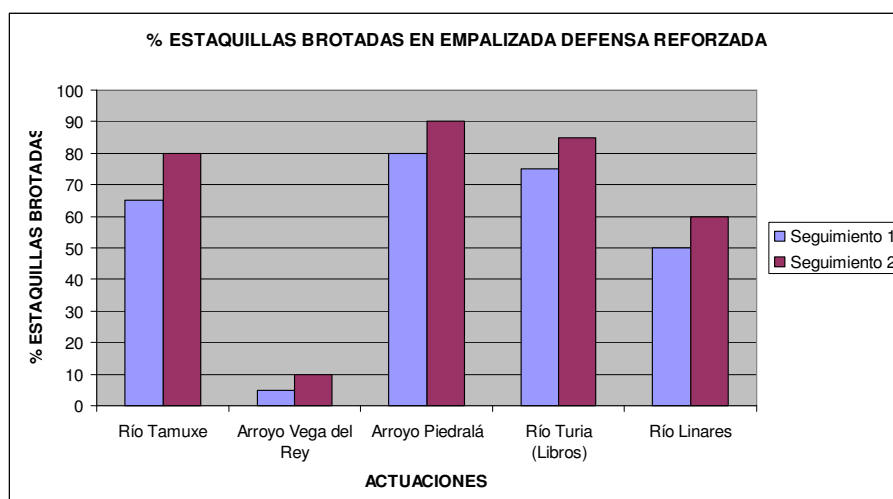


Gráfico 14. Porcentaje de estaquillas brotadas en empalizadas de defensa reforzada en los seguimientos 1 y 2.

El siguiente gráfico muestra la supervivencia de las estaquillas en función del piso en que se encuentren. En el primer piso, el más cercano a la

lámina de agua, la supervivencia está cercana al 90%, mientras que, a partir del segundo piso, la supervivencia disminuye considerablemente.

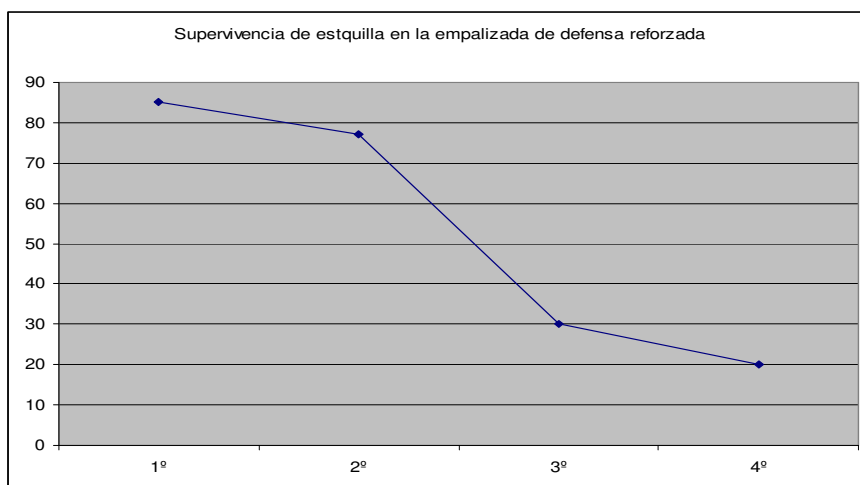


Gráfico 15. Porcentaje de supervivencia de estquillas para los distintos pisos de las empalizadas e imagen de la brotación de las mismas.

En algunos casos se han empleado siembras y/o redes orgánicas para evitar el lavado del material por la parte superior de la empalizada, con buenos resultados. Los resultados sobre la cobertura herbácea medida en las empalizadas se presentan en el siguiente gráfico.

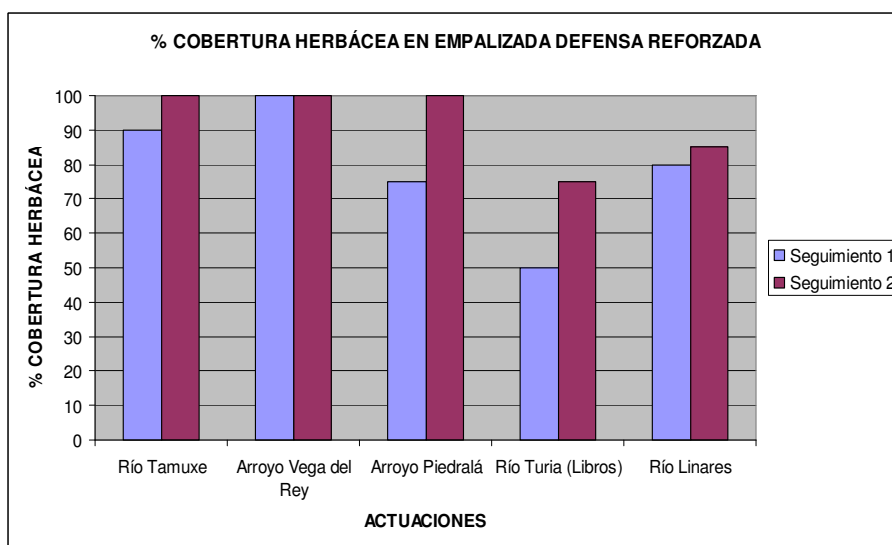


Gráfico 16. Porcentaje de cobertura herbácea en taludes en los seguimientos 1 y 2.

- Colocación de biorrollo

Se ha empleado de forma lineal y en empalizada. Las empalizadas han resultado ser una estructura muy sólida, que se estima pueda soportar velocidades y tensiones parecidas a las de la empalizada de defensa reforzada. Será preciso un periodo de seguimiento más prolongado para poder comprobarlo.

En el siguiente gráfico aparecen los porcentajes de biorrollos deteriorados en cada actuación.

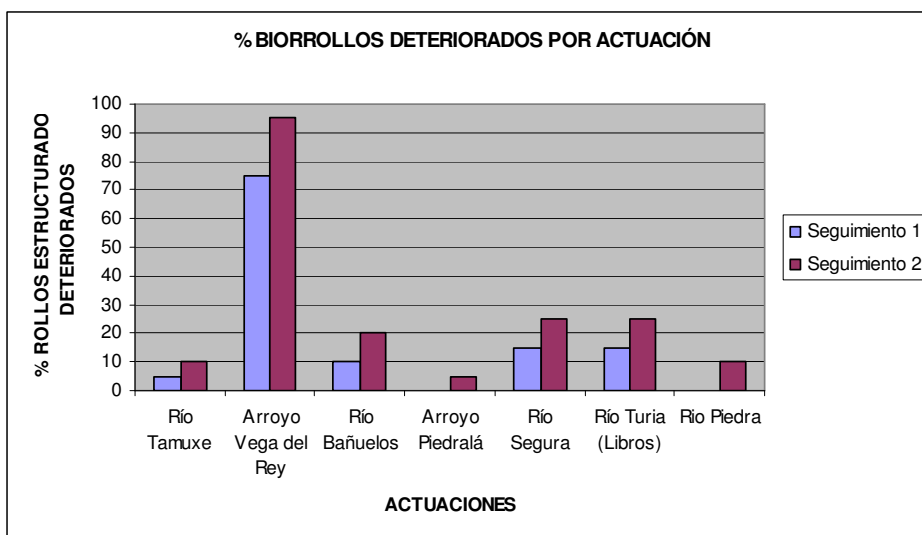


Gráfico 17. Porcentaje de biorrollos deteriorados en los seguimientos 1 y 2.

Los datos más adversos se han detectado en la actuación del arroyo Vega del Rey, donde un 95 % de los biorrollos colocados han sufrido desperfectos o han sido arrancados. Al analizar las posibles de causas de este deterioro, se ha comprobado que la velocidad del agua en las zonas donde se habían instalado biorrollos ha sido de 1,5 m/s. Esta velocidad es inferior a las que han resistido estas estructuras en otras actuaciones, por eso, se está analizando si la capacidad de los biorrollos de aumentar significativamente su peso específico unido al empuje de la corriente ha

creado tensiones de rotura en los cables o cuerdas de sujeción dejando libres los biorrollos.

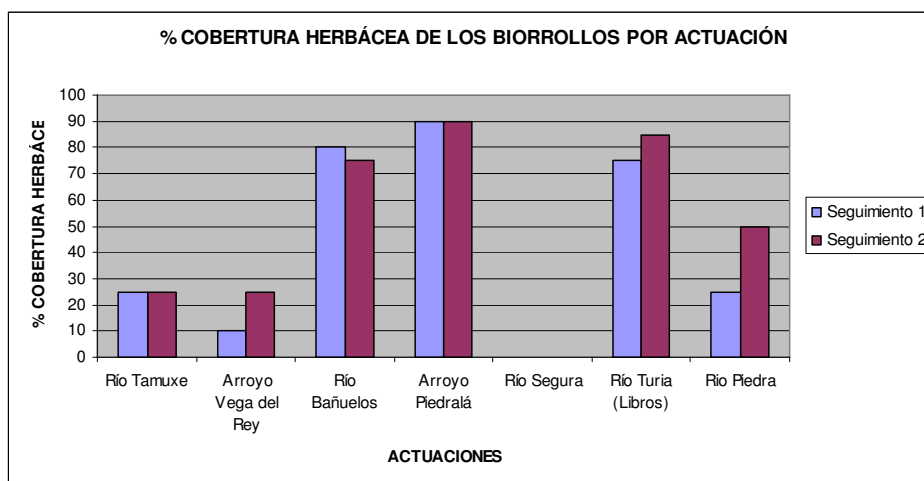


Gráfico 18. Porcentaje de cobertura herbácea de los biorrollos en los seguimientos 1 y 2.

- Protección de talud mediante el uso de material vegetal

Se han empleado raíces, tocones y principalmente troncos en la protección del talud. Han resultado muy eficaces en la protección frente a la erosión y en la relación coste-eficiencia, pues procedían de tratamientos selvícolas previos.

la actuación del arroyo Vega del Rey se han colocado troncos y biorrollos protegiendo la base del talud y mientras que hasta un 95 % de biorrollos han sufrido desperfectos y han sido arrancados, los troncos han permanecido el 100 %. Si bien, en cuanto al porcentaje de cobertura de herbáceas, el rollo resulta ser más proclive a ser colonizado.

2.3. Resultados de trabajos de gabinete

2.3.1. Modelización hidráulica:

Se ha modelizado hidráulicamente aquellas actuaciones en las que se han observado daños para establecer la relación del daño con su velocidad de

fallo. Los resultados de los modelos han sido calibrados y testeados con datos de calados y velocidades tomados en campo, para cada caudal.

Las velocidades que ya se han registrado en las diferentes técnicas se pueden ver en los siguientes gráficos. Aquellas velocidades que han producido daños se han marcado en rojo.

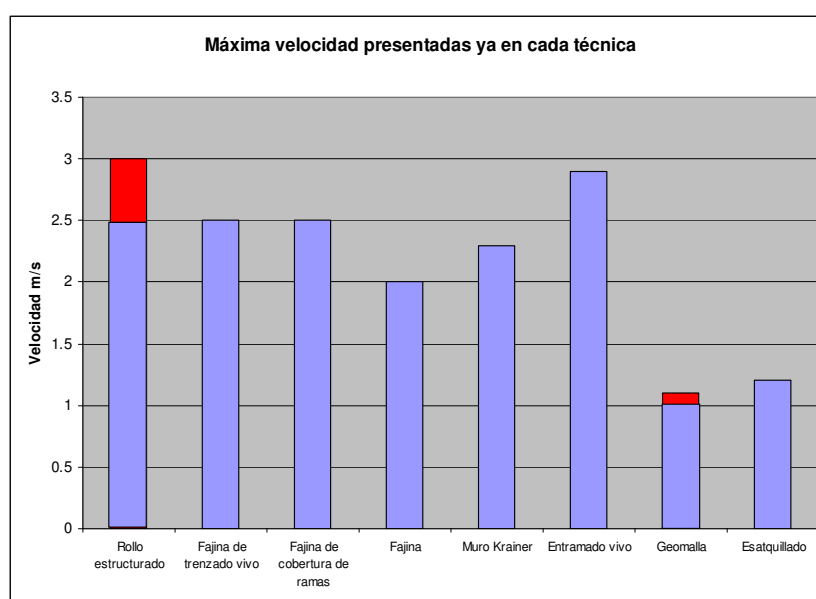


Gráfico 19. Velocidades de flujo probadas en cada técnica.

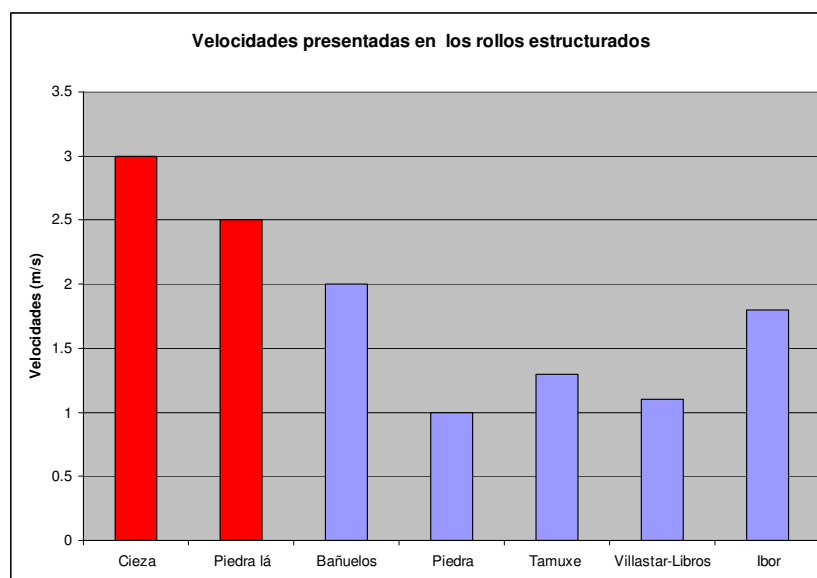


Gráfico 20. Velocidades de flujo presentadas en tramos con rollos estructurados.

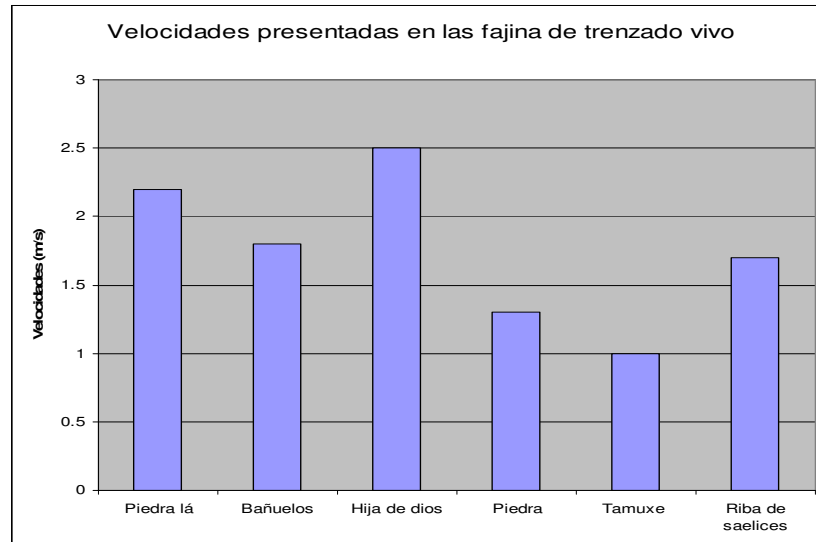


Gráfico 21. Velocidades de flujo presentadas en tramos con fajinas de trenzado.

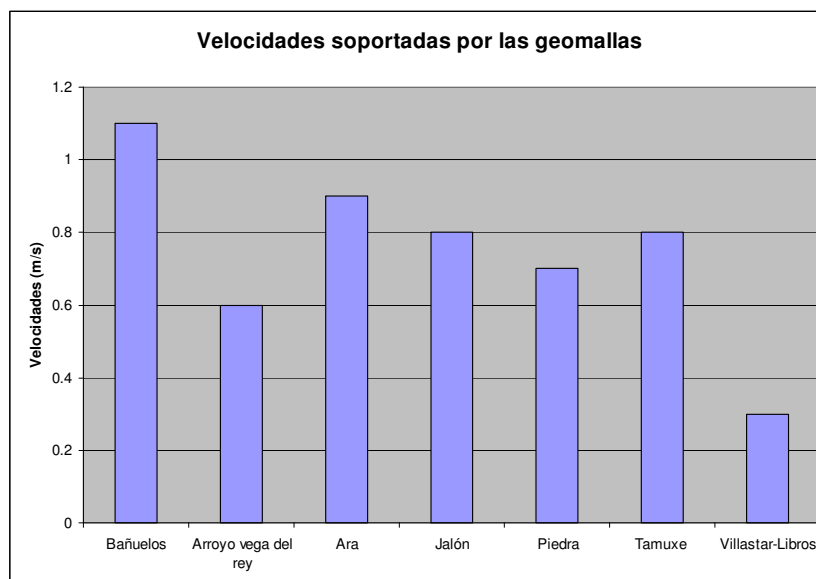


Gráfico 22. Velocidades de flujo presentadas en tramos con red o manta orgánica.

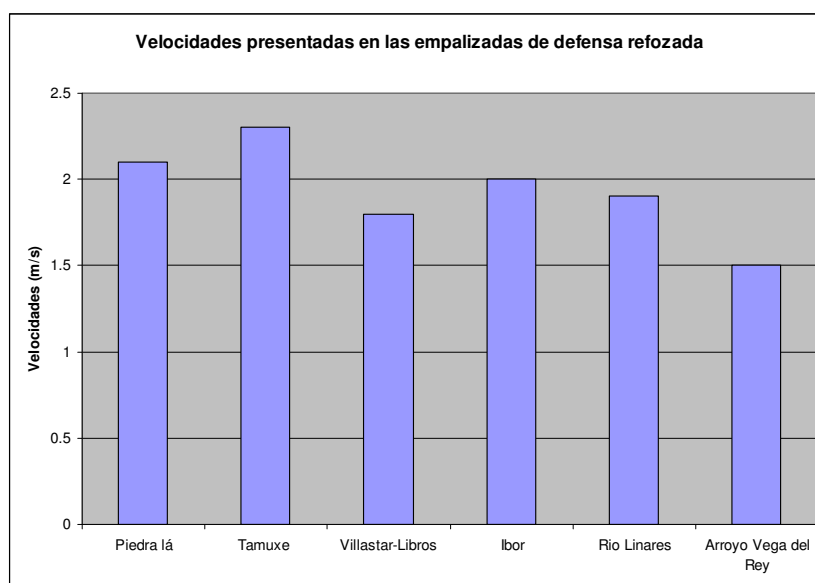


Gráfico 23. Velocidades de flujo presentadas en tramos con red o manta orgánica.

Respecto a los modelos hidráulicos, se han empleado y comparado los resultados que ofrecen los unidimensionales y bidimensionales, analizando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. Hasta ahora se han venido usando los modelos unidimensionales, obteniendo buenos resultados. Como se aprecia en la figura siguiente, no hay diferencias significativas en las variaciones del calado entre ambos modelos.

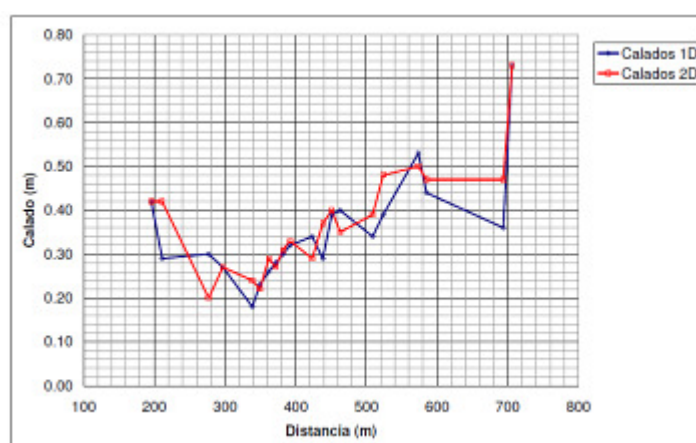
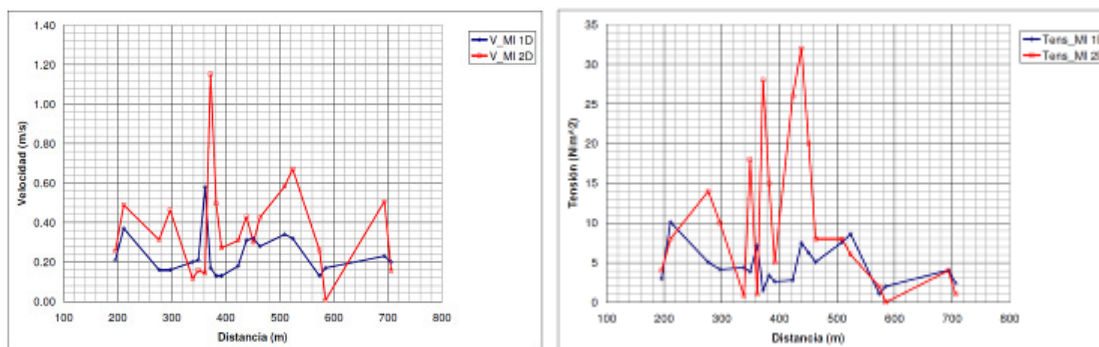


Figura 4. Ejemplo de comparativa de calados en un tramo del río Linares según modelos 1D y 2D.

No obstante para caracterizar la distribución de velocidades en una sección, las simplificaciones adoptadas por los modelos unidimensionales dan resultados con diferencias más significativas con respecto a la modelización bidimensional.



Figuras 5 y 6. Ejemplos de comparativa de velocidades (izqda.) y tensiones (dcha.) en un tramo del río Linares con modelos 1D y 2D.

Cuantitativamente, las desviaciones entre los resultados de los calados son como máximo de un 20 por ciento, entre el modelo unidimensional y bidimensional, mientras que en el análisis de la velocidad esta diferencia llega al 400 por ciento, diferencia que aumenta aún mas si cabe en el estudio de la tensiones.

2.3.2. Estabilidad de taludes:

Mediante el uso de modelos geotécnicos se han determinado las dimensiones que deben presentar las estructuras de madera formadas por postes verticales y horizontales para contener los posibles deslizamientos del talud, en función del ángulo de rozamiento interno del material y la altura del talud.

A continuación se pueden ver los datos obtenidos en el caso de postes verticales.

		ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO					
		20	25	30	35	40	45
ALTURA DEL TALUD (M)	1,0	10,51	9,87	9,24	8,63	8,02	7,41
	1,5	13,71	12,87	12,06	11,25	10,46	9,66
	2,0	16,83	15,80	14,80	13,81	12,84	11,86
	2,5	19,91	18,70	17,51	16,34	15,19	14,03
	3,0	22,97	21,57	20,20	18,85	17,52	16,19
	3,5	26,02	24,43	22,88	21,36	19,84	18,34
	4,0	29,06	27,29	25,55	23,85	22,16	20,48
	4,5	32,09	30,13	28,22	26,34	24,47	22,62
	5,0	35,12	32,98	30,88	28,82	26,78	24,75

Tabla 4. Diámetro de los postes verticales en cm.

En el siguiente gráfico se muestran los datos de la relación de los diámetros en función de la altura del talud y de los ángulos de rozamiento interno:

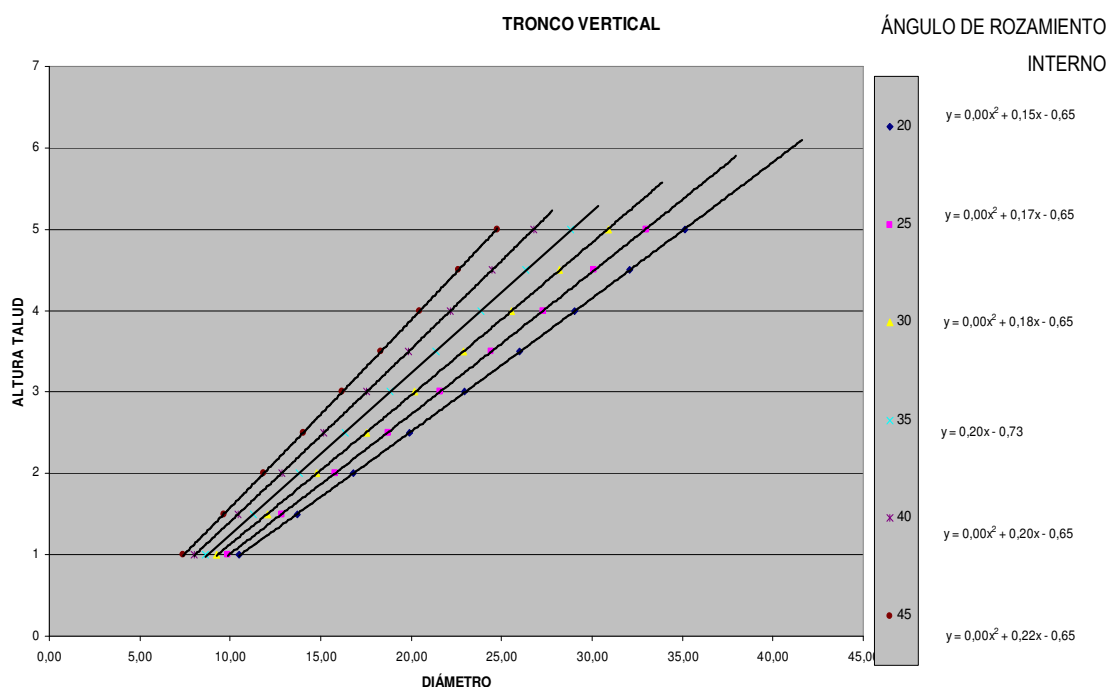


Gráfico 24. Relación de diámetros en función de la altura del talud y los tipos de suelo.

En el caso de los postes colocados horizontalmente, las dimensiones obtenidas mediante los modelos geotécnicos son los siguientes.

		ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO					
		20	25	30	35	40	45
ALTURA DEL TALUD (M)	1,0	6,02	5,65	5,29	4,94	4,59	4,24
	1,5	6,86	6,44	6,03	5,63	5,23	4,83
	2,0	7,65	7,18	6,72	6,28	5,83	5,39
	2,5	8,40	7,89	7,38	6,89	6,40	5,92
	3,0	9,12	8,56	8,02	7,48	6,95	6,43
	3,5	9,81	9,21	8,63	8,05	7,48	6,91
	4,0	10,48	9,84	9,21	8,60	7,99	7,38
	4,5	11,13	10,45	9,78	9,13	8,48	7,84
	5,0	11,76	11,04	10,34	9,65	8,96	8,28

Tabla 5. Diámetro de los postes horizontales en cm.

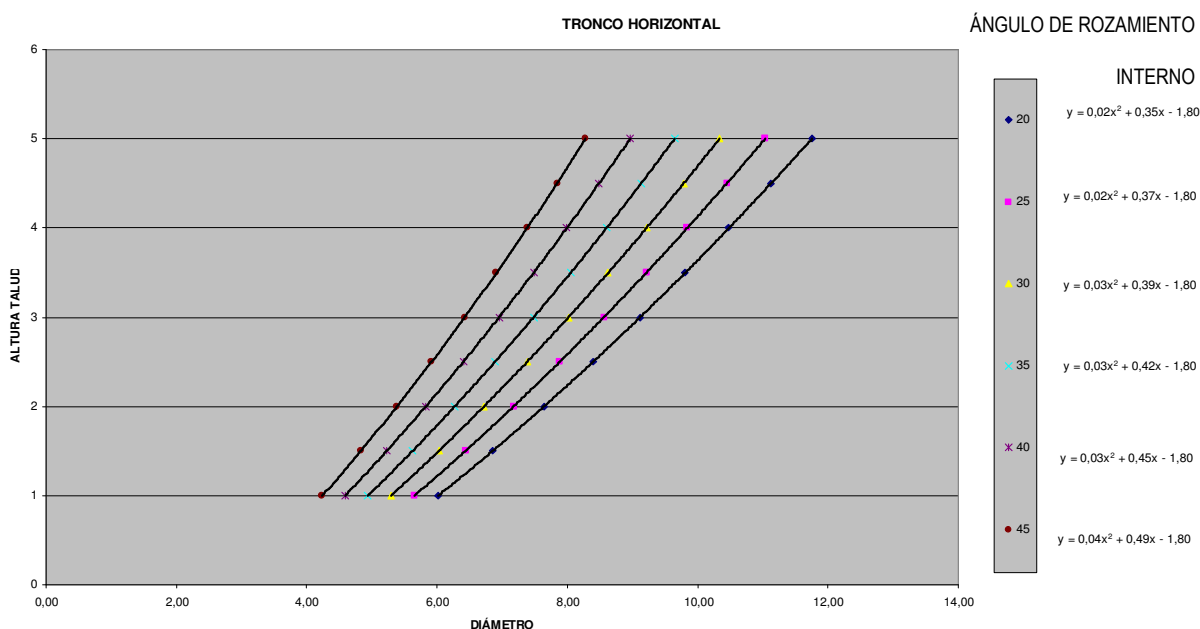


Gráfico 25. Relación de diámetros en función de la altura del talud y los tipos de suelo.

Asimismo se ha empleado un modelo matemático basado en la teoría de Mohr-Coulomb que describe la fractura del talud, es decir el posible círculo de deslizamiento.

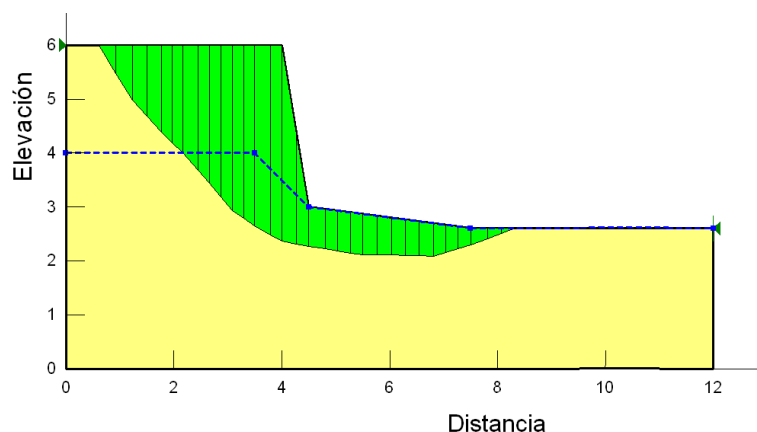


Figura 7. Salida del modelo geotécnico suponiendo los parámetros más desfavorables del terreno.

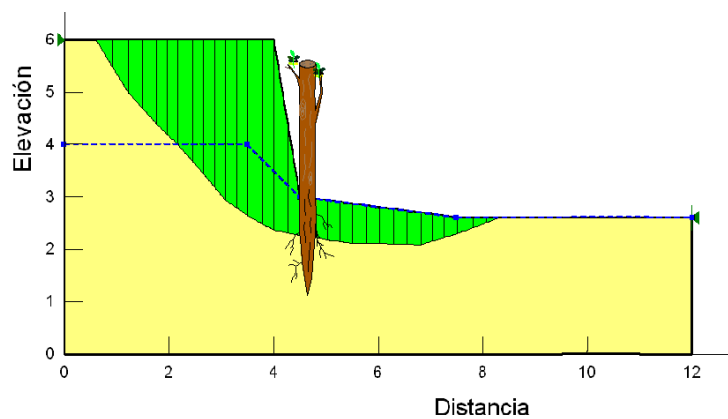


Figura 8. Croquis del talud y del poste vertical atravesando el posible círculo de deslizamiento.

Para asegurar el empotramiento del poste, se ha considerado como fuerza estabilizadora el empuje pasivo del terreno. Por lo tanto cuanto mayor sea la longitud de empotramiento, mayor será la fuerza estabilizadora. Se ha calculado la longitud a la que debe estar hincado el poste, para que el

momento generado por las fuerzas del empuje pasivo contrarreste al generado por el empuje activo.

De la misma manera se ha comprobado no solo al vuelco, sino también al deslizamiento, comprobándose que el primero es el más limitante. Las longitudes de empotramiento con las consideraciones tomadas son las siguientes:

LONGITUD DE EMPOTRAMIENTO (M)		ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO					
		20	25	30	35	40	45
ALTURA DE TALUD (M)	1,0	0,94	0,83	0,73	0,63	0,55	0,47
	1,5	1,07	0,95	0,83	0,72	0,62	0,53
	2,0	1,20	1,05	0,92	0,81	0,70	0,59
	2,5	1,31	1,16	1,02	0,88	0,76	0,65
	3,0	1,43	1,26	1,10	0,96	0,83	0,71
	3,5	1,53	1,35	1,19	1,03	0,89	0,76
	4,0	1,64	1,45	1,27	1,10	0,95	0,81
	4,5	1,74	1,53	1,35	1,17	1,01	0,86
	5,0	1,84	1,62	1,42	1,24	1,07	0,91

Tabla 6. Longitud de empotramiento en m.

3.- CONCLUSIONES

3.1. Estado ecológico

El estado ecológico de los tramos intervenidos no ha mejorado claramente, a pesar de aumentar el nº de actuaciones con estado moderado y disminuir el nº de actuaciones deficientes. Esto es debido a que la segunda evaluación se ha llevado a cabo al finalizar las obras cuando aún no se aprecian las mejoras realizadas. Por ello, se estima necesario prolongar la fase de seguimiento del estado ecológico al menos 5 años después de la ejecución de las técnicas para que cada actuación alcance su estado óptimo.

Además se ha comprobado que algunos índices utilizados en la actualidad, valoran negativamente cualquier actuación realizada por el hombre aunque éstas sean con materiales vegetales como lo hacen las técnicas de bioingeniería. Es por esto que, se está trabajando en el desarrollo de un nuevo índice que evalúe los cauces intervenidos con dichas técnicas estableciendo un sistema de medida uniforme de la mejora del estado ecológico.

En la actuación del río Piedra se ha llevado a cabo una prueba piloto en la que se han valorado parámetros como: régimen de caudales, efecto barrera, porcentaje de río remansado, naturalidad del trazado y de márgenes, conectividad lateral, lecho del río y vegetación de ribera.

Una vez valorado cada parámetro se marca en un gráfico radial y se mide el área encerrada. Cuando mayor sea el área menos modificado será el cauce y mejor será su estado ecológico.

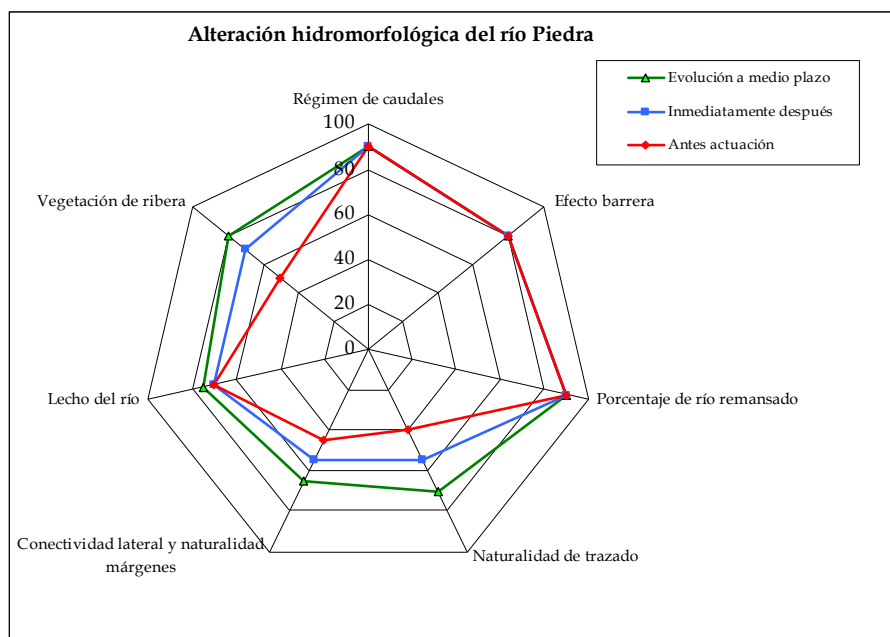


Gráfico 26. Prueba piloto de índice hidromorfológico que valore las obras de mejora ecológica.

3.2. Modelización hidráulica

Se han observado diferencias en los resultados obtenidos de modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales, especialmente si se estudian variables como la velocidad, la tensión de corte o la potencia disipada.

De esto se puede deducir que los modelos bidimensionales permiten tomar decisiones con mayor precisión que los unidimensionales seleccionando la ubicación, técnica y dimensionamiento idóneo.

Estos estudios permitirán diagnosticar las causas que provocan la erosión, decidir en qué tramos se debe actuar, seleccionar las técnicas más idóneas y dimensionarlas correctamente reduciendo costes.

3.3. Consideraciones de cada técnica de bioingeniería ensayada

Del seguimiento, estudios realizados en gabinete y de la experiencia en la ejecución de las técnicas, se pueden realizar las siguientes consideraciones:

- Fajinas.
 - Las estructuras formadas por fajinas resisten velocidades de flujo de 2,5 m/s sin sufrir daños.
 - Es importante determinar con precisión el dimensionamiento de los postes donde irán ancladas las fajinas ya que serán estos los que contengan inicialmente el terreno. Se aconseja el empleo de estacas de al menos 4 cm de diámetro, y longitud tal, que atraviese y se ancle por debajo del círculo de deslizamiento del talud.
 - Como hemos observado en las actuaciones del río Tamuxe y arroyo Vega del Rey, el lavado del trasdós de la estructura formada por fajinas

puede bajar el porcentaje de brotación. Por eso, es importante que el material de relleno tenga una granulometría continua para evitar el lavado.

- En cuanto al material utilizado para confeccionar las coberturas de ramas es conveniente tener en cuenta la flexibilidad del material, que las varas a emplear superen 1 m de longitud para que puedan unir dos postes de fijación, así como que la base de las ramas se encuentre en contacto con el terreno. De este modo tendrán mayores posibilidades de enraizar.



Foto 1. Cobertura de ramas en actuación de garganta de Chilla (Candeleda, Ávila).

- Empalizadas.

- Son estructuras diseñadas para soportar corrientes de agua más desfavorables que en el caso de las fajinas, y resisten velocidades de flujo de 2,9 m/s.
- Para este tipo de estructuras se aconseja un diámetro de postes superior a 4 cm (dependiendo de la altura del talud) y longitud tal, que

atraviase y se ancle por debajo del círculo de deslizamiento del talud, fijándose en el terreno un mínimo de 50 cm.

- Con respecto al relleno del trasdós, se deberán tener en cuenta las mismas premisas expuestas para el caso de las fajinas.
- El punto de empotramiento de los postes es el que soporta mayores solicitaciones, debidas a los empujes del terreno, generándose esfuerzos a flexión, por lo que deberá ponerse especial cuidado en que el material a emplear no presente ningún defecto (nudo, pudrición, grieta, etc.) que pueda afectar a la capacidad resistente de la estructura.



Foto 2. Empalizada en actuación de río Turia (Libros, Teruel).

- Redes o mantas orgánicas.

- Las redes o mantas orgánicas sin protección en la base del talud resisten velocidades de flujo de 1,5 m/s y aquellas que disponen de protección en la base como biorrollos, troncos o escollera soportan velocidades de 1,7 m/s.

- El fallo más común es que se levanten con el paso de la corriente. Para evitarlo se deberá tener en cuenta que la disposición longitudinal debe ser paralela al cauce, reduciendo así los solapes expuestos a la corriente. Los solapes deben tener una anchura mínima de 30-50 cm.
- Desde un punto de vista ambiental se recomienda utilizar estaquillas en la sujeción de redes o mantas orgánicas, ya que así no se introducen elementos ajenos al entorno, si bien resultan más caras que las grapas metálicas.
- En las actuaciones cuyos taludes con pendientes superiores a 45° hemos observado desgarros y falta de estabilidad por lo que se recomienda la utilización de al menos 6 estaquillas o grapas por metro cuadrado y la protección de la base del talud con otras técnicas como la colocación de gavión flexible, elementos inertes, vegetales o rollo estructurado.
- Se recomienda el uso de la matriz orgánica desde la orilla hasta la mitad del talud cubriendo la primera banda pues reduce costes y se protege la zona más próxima al cauce que es la más afectada en caso de crecidas.



Foto 3. Red orgánica en actuación de río Bañuelos (Fernán Caballero, Ciudad Real).

- Gaviones.
- El uso de gaviones prismáticos rectangulares es de gran utilidad cuando se necesite proteger personas o infraestructuras de importancia y no sea viable el empleo de otras técnicas y se debe tener en cuenta que supone una difícil integración paisajística al presentar, estos elementos, una composición y morfología radicalmente distinta a los patrones ribereños y por tanto, considerarse siempre como elementos de intrusión visual.
- El uso de gaviones flexibles combinados con rollos estructurados vegetados ha dado buenos resultados en la estabilización, soportando velocidades de 1,7 m/s, mejorando el desarrollo de la vegetación implantada y evitando el impacto paisajístico y que habría producido el empleo de gavión prismático rectangular.
- Se destaca la funcionalidad del gavión flexible como complemento a otras técnicas, en la base de los taludes o protegiendo el arranque de las mismas.



Foto 4. Gavión cilíndrico flexible en actuación de río Linares (Riba de Saelices, Guadalajara).

- Muros Krainer.
- Esta técnica permite estabilizar y reconstruir márgenes de ríos resistiendo velocidades superiores a 4 m/s y encuentra limitación en taludes de pendientes superiores a 55°.
- Debido a la rigidez de la estructura y a su elevado coste, se aconseja su uso únicamente en la protección de personas, infraestructuras u otros bienes en que quede claramente justificado.
- Los troncos empleados en las actuaciones del proyecto han tenido diámetros comprendidos entre los 20 y 40 cm cumpliendo las solicitudes físico-mecánicas presentadas. Se reducen costes utilizando troncos de las labores de limpieza previas o de alguna zona próxima a la actuación.
- Se debe evitar el uso de especies alóctonas por el peligro de rebrote y colonización de las mismas. Se recomienda el uso de especies cuya madera tiene baja degradabilidad.

- Las estaquillas insertadas deben ser especies autóctonas de ribera con gran capacidad vegetativa como las salicáceas propias de cada actuación.
- El material de relleno debe tener una granulometría continua para evitar el lavado pero conteniendo elementos finos suficientes que favorezcan el desarrollo de la vegetación.



Foto 5. Muro Krainer recién ejecutado en actuación de río Tamuxe (Oia, Pontevedra).



Foto 6. Muro Krainer después de dieciocho meses en actuación de río Tamuxe (Oia, Pontevedra).

- Biorrollos.

- Se han detectado fallos en biorrollos vegetados colocados en tramos que soportan velocidades de 2,5 m/s. No tienen problemas para resistir por debajo de esa velocidad cuando los biorrollos son vegetados.
- Esta técnica puede limitar la entrada de especies invasoras que se propaguen vegetativamente favorecidas por la corriente (p.ej. *Arundo donax*), impidiendo el contacto directo de propágulos con su medio de dispersión y colonización.
- Se considera una buena técnica para proteger la base del talud y favorece la retención de finos.

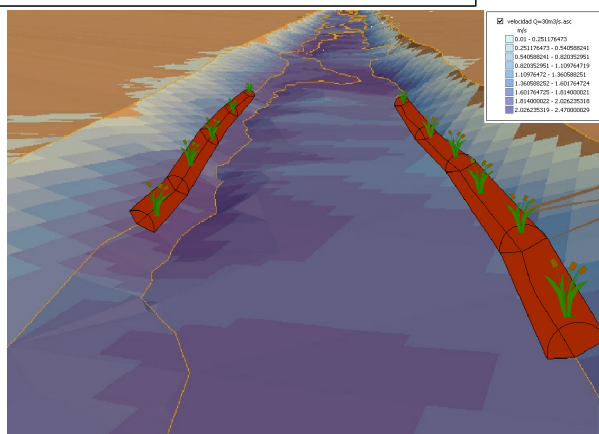
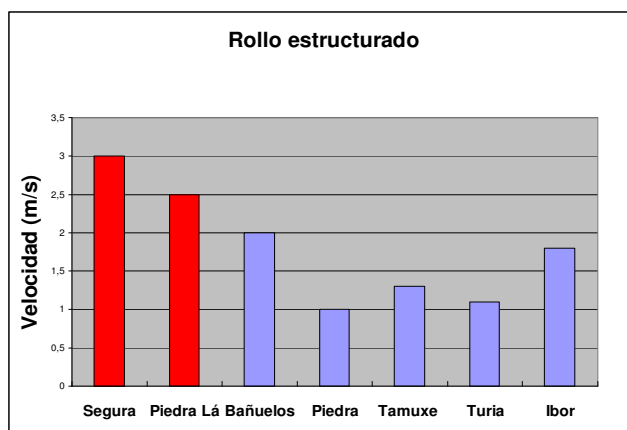


Figura 10 y 11. Velocidades que han soportado los tramos con rollos estructurados (en rojo, las actuaciones en las que se han detectado daños) y simulación de la avenida presentada en febrero de 2010 en el arroyo Piedra Lá.

- Escolleras.

- Al igual que ocurría con los gaviones, el uso masivo de elementos inertes muy alejados en volumetría, material y color de los característicos del patrón ribereño, conlleva un impacto paisajístico y visual incompatible con la filosofía de la restauración, por lo que la formación de escolleras se indica exclusivamente cuando la estabilización no pueda conseguirse con técnicas que empleen materiales vegetales y se debe intentar reducir el posible impacto ambiental.
- Pero debe ser considerada como solución para proteger la base del talud y otras técnicas desarrolladas en él.

- Protección con material vegetal (troncos, tocones, árboles enteros, etc.)
- Este tipo de estructuras han soportado velocidades de flujo de 3,5 m/s.
 - El material vegetal procedente de tratamientos selvícolas reduce los costes en la ejecución de las técnicas.
 - Se protege la base del talud con un impacto paisajístico y visual mínimo.
 - La ejecución de deflectores con este material permite modificar la dirección del flujo para proteger otras técnicas y crear remansos que en el futuro supondrán la creación de nuevos hábitats mejorando el estado ecológico del curso fluvial.



Foto 7. Troncos protegiendo la base del talud en actuación de arroyo de Vega del Rey (Cacabelos, León).

- Plantación con especies leñosas arbóreas y arbustivas.

- El estudio del régimen de caudales anual resulta primordial para la distribución de las bandas de ribera.
- Al menos en las primeras temporadas conviene proteger las plantaciones del ramoneo de herbívoros preferiblemente limitando el paso mediante cerramiento y, si no es posible, mediante protectores individuales. El uso de tutores en las plantaciones puede producir descalces por periodos de crecida e impedirán que la planta pueda enderezarse por sí misma.
- Puede ser recomendable favorecer la supervivencia de las plantaciones frente a herbáceas e invasoras mediante desbroces puntuales. Así como la realización de alcorques y riegos para evitar la desecación.
- Las plantaciones de especies arbustivas de pequeño tamaño resultan indicadas para el contacto con corrientes de baja velocidad, ejerciendo una doble función de retención de finos y permitiendo el establecimiento de macroinvertebrados. Mientras que las especies arbóreas se deben situar en segunda línea o banda de ribera, ya que sus raíces pueden profundizar más en el suelo que las arbustivas y su capacidad de retención de finos frente a la corriente es menor.
- Las plantaciones resultan un complemento adecuado de las técnicas de ingeniería biofísica (que no usan material vivo) ya que en caso de degradación, estas ya habrán enraizado y podrán contribuir a la estabilidad del talud con el paso del tiempo.
 - Estaquillado.
- Se aconseja emplear el estaquillado como técnica complementaria a la instalación de geomallas y cubriciones orgánicas, sustituyendo a las grapas metálicas, ya que el uso de éstas implica generar un residuo en el área de ribera.
- Se debe recolectar el material en el entorno de la actuación, tanto por motivos económicos de ahorro en los desplazamientos, como para

evitar en lo posible los fenómenos de hibridación, frecuentes en las especies del género *Salix*.

- Las estacas deben alcanzar el nivel freático y presentar suficiente diámetro como para poder clavarse en el terreno sin sufrir roturas ni desgarros. La experiencia nos aconseja el empleo de material de aproximadamente 80 cm de longitud y un diámetro de entre 2 y 5 cm.

Con la información recopilada en este proyecto se han elaborado unas tablas con posibles combinaciones de técnicas a ejecutar según la pendiente del talud, la velocidad del agua y la importancia del elemento que se debe proteger. Así mismo se han confeccionado fichas de cada combinación exponiendo el ámbito de aplicación, la fase constructiva y diversas recomendaciones de ejecución.

3.4. Consideraciones finales

La principal conclusión a la que se ha llegado en el desarrollo de este proyecto es que no se debería intervenir en aquellos casos en los que se pueda permitir cierta libertad fluvial, mientras que en los tramos en los que la erosión afecte a la seguridad de personas, infraestructuras u otros bienes que necesiten protección, se debe estudiar cuál es la técnica o combinación de técnicas más indicada en cada caso y se deben calcular las dimensiones necesarias.

El seguimiento desarrollado hasta ahora arroja aún resultados parciales y se estima que se necesitarán varios años para comprobar la resistencia y evolución de las técnicas frente a fenómenos de avenida extraordinarios y a climatología adversa que aún no se han presentado.