

# **METODOLOGÍA DE INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS DE EROSIÓN DE LECHO Y ORILLAS CON EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES. POSIBLES APLICACIONES PRÁCTICAS EN LOS PROYECTOS Y OBRAS DE RESTAURACIÓN FLUVIAL.**

Guillermo Tardío Cerrillo · Ingeniero de Montes · gtarcer@gmail.com

La mayoría de los estudios relacionados con la estabilidad de las orillas de los ríos no cuentan con una adecuada combinación de los principales agentes que rigen este proceso: erosión, flujo subsuperficial y análisis de estabilidad.

En este artículo se propone un esquema metodológico que incorpora los anteriores parámetros de cara a evaluar la posible evolución de las secciones transversales y la planta de un río o tramo fluvial. La metodología propuesta es de aplicación a nivel proyecto, en las fases de seguimiento y en el estudio de la efectividad de las actuaciones de restauración fluvial.

Palabras clave: erosión, estabilidad, ladera, ribera, restauración fluvial.

## **INTRODUCCIÓN**

Los sistemas fluviales son complejos y siempre incorporan un esquema de interconexión con el resto del entorno. En los cursos de agua se puede observar claramente cómo las actuaciones en una zona afectan a otra dada su conectividad lateral, longitudinal y vertical (Kondolf, 2002).

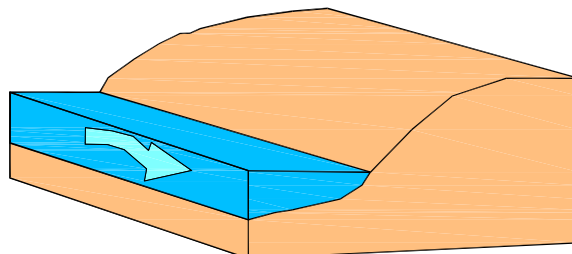
Con la metodología que se expone a continuación se pretende mejorar la eficiencia en el análisis del comportamiento de los sistemas fluviales y en el diagnóstico de la problemática existente. También se intenta aportar nuevas herramientas y enfoques que puedan ser utilizados tanto para analizar el funcionamiento de las actuaciones de restauración fluvial realizadas o planteadas a nivel proyecto como en la mejora en su ejecución y seguimiento.

Entendiendo los proyectos de restauración fluvial como una interacción entre una gran variedad de disciplinas y profesionales, la metodología propuesta aporta más información para la correcta toma de decisiones en la solución de problemas.

El análisis del medio fluvial debe combinar e integrar parámetros relacionados con el flujo subsuperficial con otros relacionados con el agua superficial y sus efectos. La manera de trabajar con todas las anteriores variables es lo que se organiza y define en el método propuesto.

## **PROTOCOLO METODOLÓGICO**

El fallo de los suelos riparios debido a la erosión hídrica es el resultado de la tensión de arrastre en los taludes y el consecuente aumento de su inclinación.



*Figura 1. El fenómeno de la erosión hídrica*

Se indica a continuación, de forma ordenada, los parámetros a considerar.

## 1. El análisis de los escenarios de avenida

No hay un acuerdo sobre cuál es el escenario más desfavorable en términos de estabilidad de los suelos riparios. La opinión más extendida defiende que es más desfavorable un hidrograma complejo y prolongado con varios picos antes del principal que un hidrograma de mayor entidad con único pico aislado (Rinaldi, 2004). Queda fuera del alcance de este artículo arrojar algo de luz en este tema aunque cabe señalar que la metodología propuesta permite comparar la evolución de los suelos riparios para cualquier secuencia de avenidas.

Como primer paso, previa selección de la escala temporal y los escenarios de avenida, se discretizará el hidrograma (hidrograma escalonado) para analizar los fenómenos erosivos a medida que el nivel del agua vaya variando. Para ello será necesario realizar un análisis en régimen no permanente de cada avenida mediante programas tipo RIVER 2D, TELEMAC 2D, GUAD2D, MIKE, etc. El programa HEC RAS, si bien está limitado a análisis unidimensionales, permite realizar este tipo de análisis de avance de la onda de avenida.

El método en este punto es muy flexible pudiéndose analizar una avenida aislada o la secuencia de avenidas ocurridas, por ejemplo, durante un año de fuertes precipitaciones.

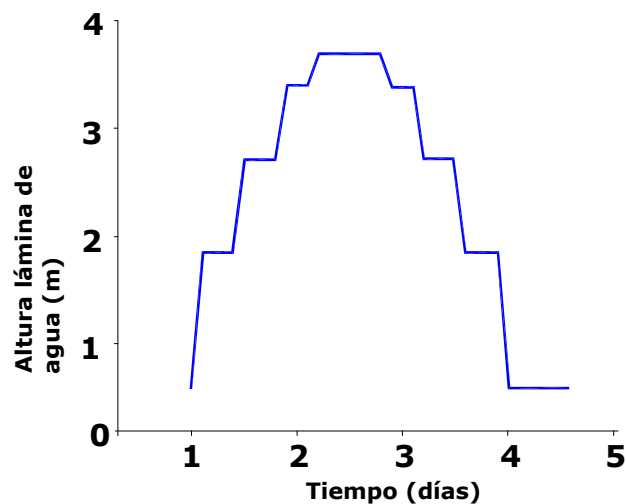


Figura 2. Hidrograma escalonado formado por una secuencia de flujos en régimen permanente

Una posible combinación de avenidas sería la correspondiente al caudal dominante o la máxima crecida ordinaria y la avenida de periodo de retorno de 50 o 100 años. Entre estas dos situaciones, la diferencia de cota entre el flujo subsuperficial y las aguas superficiales crea el marco de situación crítica del análisis de estabilidad. Se realizará un análisis en régimen no permanente para cuantificar este tiempo de desfase durante el cual tanto las tensiones efectivas como la presión de confinamiento del agua del cauce tendrán su valor mínimo. Esta situación combinada con posibles fenómenos erosivos en el pie y cuerpo de las orillas constituye el momento crítico a analizar en la metodología propuesta.

## 2. El flujo subsuperficial

Los suelos riparios no tienen una resistencia a cortante constante a lo largo del año. Su resistencia varía según su contenido en humedad y la cota del nivel freático. Cuanto más húmedo esté el suelo y más alto sea el nivel freático mayor será la probabilidad de fallo. Esto suele ocurrir durante las bajadas del nivel de agua superficial debido a la disminución de la presión de confinamiento de los taludes.

Dentro de las variables que afectan al valor del Factor de Seguridad (FS) encontramos la tasa de infiltración en el suelo y la rapidez de bajada de la lámina de agua del río. En ambos casos, un mayor valor de estas variables repercute negativamente en el valor del FS.

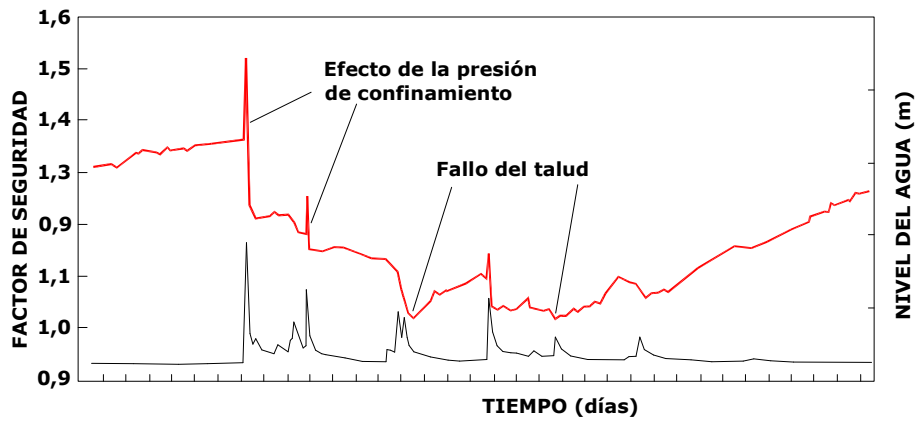


Figura 3. Variación del Factor de seguridad con la evolución de la avenida

Debido a lo anterior, el análisis del flujo subsuperficial es esencial a la hora de estudiar el comportamiento de los suelos riparios.

Mediante el análisis en régimen no permanente de la avenida de estudio (por ejemplo  $T = 100$  años) podemos obtener la variación del nivel del agua en las distintas secciones seleccionadas. También podremos estimar si la variación de nivel de agua es suficientemente lenta para permitir el equilibrio con el nivel freático.

Aparte, la simulación del episodio de lluvias en una determinada sección nos permite calcular el nivel del agua subterránea a partir de la permeabilidad, la curva granulométrica del suelo y la función de conductividad hidráulica.

Con suficiente información de los suelos que forman las orillas, los análisis a realizar son la variación del nivel de agua subsuperficial, incluyendo la infiltración procedente de la lluvia, y la aportación del agua del cauce.

En particular, se aconseja realizar una simulación de la tasa de infiltración mediante las curvas de infiltración. También es posible simular la tasa de infiltración con programas tipo SEEP/W (Geostudio).

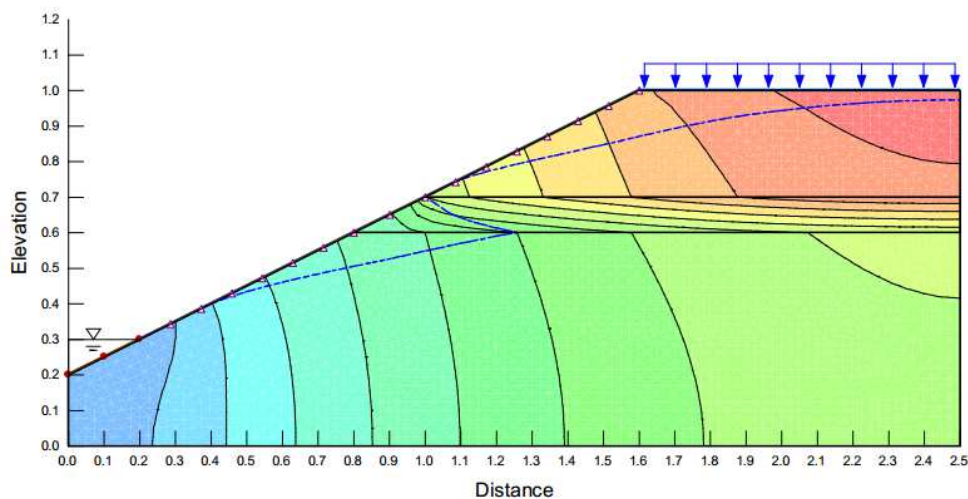


Figura 4. Simulación infiltración en SEEP/W (Geostudio)

Con las dos anteriores simulaciones podremos calcular el nivel de agua subterránea y el nivel de agua superficial. Tras la bajada de la lámina de agua hasta la cota correspondiente al caudal dominante, el nivel de aguas subterráneas tardará en equilibrarse (la ladera no habrá drenado) debido a la respuesta más lenta del flujo subsuperficial. Este desfase se irá eliminando con el tiempo siendo necesario un mayor lapso cuanto menor sea la permeabilidad del suelo.

La mayor o menor brusquedad de la variación del nivel de aguas influirá en la capacidad del terreno para equilibrar (disipar) sus presiones de poro.

Para el análisis transitorio del flujo subsuperficial se utilizará una función de contorno que refleje de forma aproximada la variación del nivel del agua superficial con el tiempo.

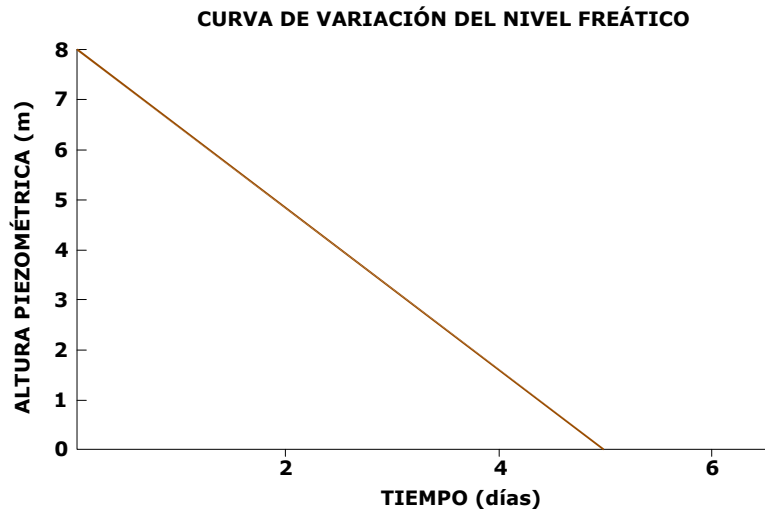


Figura 5. Ejemplo de función de contorno para el análisis del flujo subsuperficial

### 3. El análisis de la erosión

Como primer punto se comprobará para cada tramo si existe inicio de erosión mediante el diagrama de Shields o mediante el criterio de caudal de Yalin-Karahan. Con este último método se puede obtener el caudal a partir del cual comenzaría la erosión en el tramo de estudio.

Se escogerá el método de cálculo de erosión general que mejor se adapte a la zona de estudio sobre todo si ya se ha comprobado en anteriores trabajos qué método da buenas estimaciones de caudal sólido. Así, por ejemplo, si se trata de un cauce de gravas se aconseja el método de “velocidad crítica y agua clara” (Martín Vide et al, 2005).

Los métodos de cuantificación de la erosión general utilizan la comparación de la tensión de arrastre con un valor crítico de tensión cortante (tensión crítica) o la comparación de la velocidad media y la velocidad de equilibrio o crítica (aquella para la que no se produce erosión). Se propone la utilización del método de Lischvan-Levediev combinado con el método del índice de erosión (Rinaldi y Darby, 2008) para la zona de las orillas. La razón de esta combinación se debe a que el método de Lischvan-Levediev se centra en el análisis de erosión del lecho infravalorando el arrastre en las orillas. Con esta combinación se obtienen valores de caudal sólido y de cambios en sección más aproximados a la realidad.

En cada sección se discretizará el radio hidráulico para la generación de los valores de tensión de arrastre a lo largo del lecho y las márgenes. En la siguiente figura se muestra este proceso:

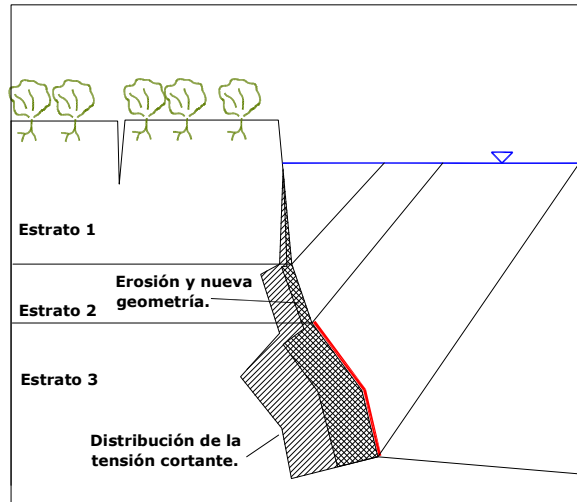


Figura 6. Cálculo de cortante en los márgenes

Las pérdidas de sección calculadas se tomarán perpendiculares a la topografía original. La anchura a utilizar para obtener la profundidad del fenómeno erosivo será la anchura de cada banda de cálculo del radio hidráulico medida sobre el propio cuerpo de la orilla (se indica en color rojo en la figura 6).

Las márgenes se discretizan para evitar problemas a la hora de calcular la erosión lateral. Se consigue así una mayor exactitud en el cálculo de las tensiones cortantes a lo largo de la orilla lo que permite predecir con mayor exactitud su evolución.

Se propone también la comprobación con el método MPM (Merged Perpendicular Method, Khodashenas y Paquier, 1999) tanto para la zona de orillas como para el lecho.

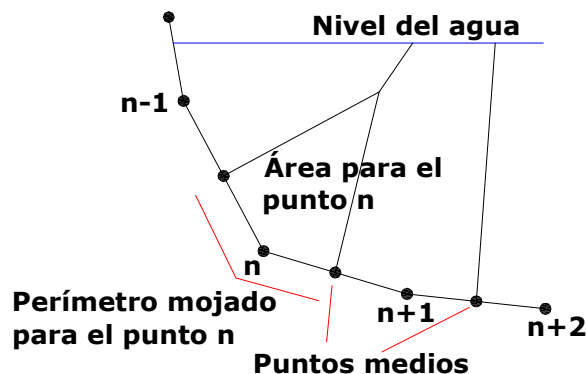


Figura 7. Método MPM (Merged Perpendicular Method)

Otro de los parámetros que entraña dificultad es la determinación de la tensión cortante crítica. Se recomienda la obtención de ese valor mediante trabajo de campo (Hanson, 1990). Si lo anterior no es posible, la tensión cortante crítica puede obtenerse a partir de estudios similares, del diagrama de Shields o de las bases de datos existentes (Knapen et al, 2007).

En el caso de existir estructuras transversales, los anteriores métodos se combinarán con cálculos de erosión local (por ejemplo, en pilas de puentes, estribos, etc).

Dado que la selección de la función de transporte es crítica en esta metodología, será uno de los parámetros a calibrar. Para ello, siempre que sea posible, se buscarán datos históricos de evolución de orillas y se contrastará con la predicción obtenida con distintos métodos de cálculo de la erosión general. De esta manera, se obtendrá la fórmula que mejor se ajuste al ámbito de estudio. Otro método válido para realizar este cálculo es realizar un seguimiento de una zona con laderas inestables y comprobar su evolución para contrastar los resultados obtenidos con la metodología de cálculo propuesta en este artículo. El uso de una serie

histórica de fotografías aéreas (con escalas entre 1:10.000 y 1:30.000) en conjunción con los niveles de agua asociados puede ser muy útil a la hora de entender las causas que han provocado los fenómenos de transporte y sedimentación (la dinámica del sistema).

El parámetro tiempo dependerá de la escala temporal del estudio. Si se quiere analizar la evolución a lo largo de un determinado año (por ejemplo, un año con crecidas extraordinarias), se necesitarán datos de las distintas avenidas ocurridas y su distribución anual. En estos casos, la tasa de erosión se suele calcular a nivel diario. En caso de analizar una avenida en concreto, la escala temporal se puede reducir a la hora o a una fracción de la misma. Por tanto, el nivel de discretización temporal del fenómeno erosivo es variable y se ajustará al objetivo de la simulación.

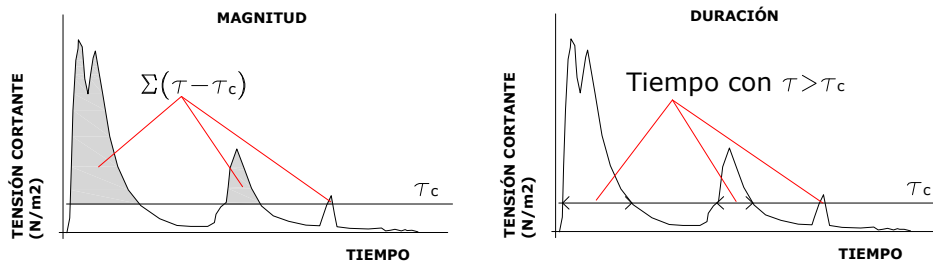


Figura 8. Exceso de cortante durante una avenida

En la zona de curvas o meandros se calculará el cortante incluyendo la componente de la velocidad en las dos direcciones. Como mínimo se utilizará en los cálculos el incremento de altura de la lámina de agua en el borde exterior de la orilla.

Cuanto más se refine esta discretización de la subida y bajada de aguas, más exactitud se logrará en la obtención del tirante de agua a partir del cual comienza la erosión. Por otro lado, si existiera erosión en el pie, se analizaría la estabilidad del talud con la nueva geometría y, tras esto, volveríamos a analizar la erosión para el siguiente incremento de la lámina de agua. Se continuará con este procedimiento hasta completar la duración total del hidrograma. Esto se muestra más adelante mediante un diagrama de flujo.

#### 4. El análisis de estabilidad

Se utilizará un método combinado del análisis de elementos finitos con los métodos tradicionales de equilibrio límite (Krahn, 2004). De esta manera, no sólo se obtendrá un valor global del factor de estabilidad sino que también se obtendrán valores del factor de estabilidad local. Con esta información podremos encontrar fenómenos de inestabilidad latentes y lo podremos cuantificar mediante el índice de Skempton (porcentaje de la superficie de deslizamiento con factor de estabilidad local inferior a la unidad) (Skempton, 1964).

En la metodología propuesta se incluyen mejoras en la manera de analizar el flujo subterráneo de agua con respecto a la manera tradicional de hacerlo en los análisis de estabilidad de laderas y riberas. También se incluyen los efectos de las fuerzas intersticiales.

En el análisis de estabilidad se utilizarán los métodos de optimización de la superficie de deslizamiento para obtener la forma más realista posible de la falla del terreno.

Como mínimo se realizarán las siguientes comprobaciones:

1. Por un lado, análisis de la erosión general para el momento de máximo calado en la sección.
2. Por otro lado, análisis de estabilidad del talud incorporando los resultados del análisis de erosión y en el momento de mayor desfase entre la cota del agua superficial y el nivel freático.

Se contemplan de la anterior manera, las situaciones que incluyen los momentos críticos que soportarán las orillas o laderas del ámbito de estudio.

En caso de no disponer de datos o querer realizar una simulación preliminar se propone la suficiente metodología:

- En una primera fase de subida de aguas se supone que el nivel freático se nivela con la nueva cota de lámina de agua.
- En una segunda fase de bajada de aguas se supone que el nivel freático se mantiene en su nivel y existe un desequilibrio entre el nivel de aguas superficial y subterránea.

Es en esta segunda fase donde se producen las mayores caídas en el valor del factor de estabilidad debido a la conjunción de valores más bajos de las tensiones efectivas y de la presión de confinamiento sobre el cuerpo del talud. A falta de otros datos, esta metodología está del lado de la seguridad en los resultados obtenidos.

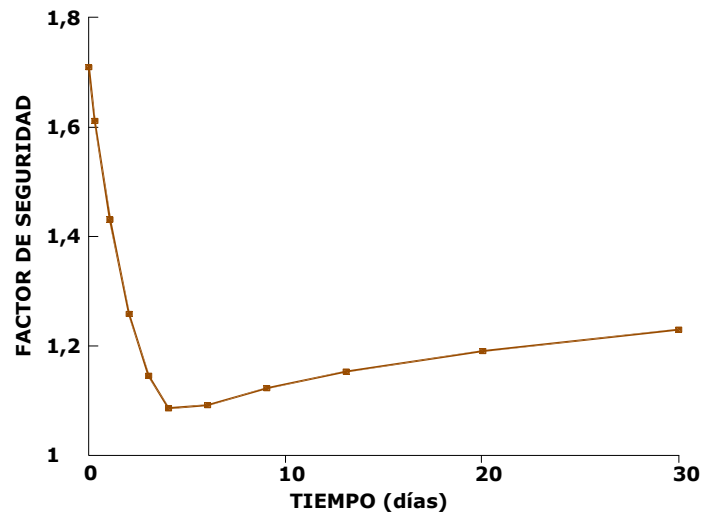


Figura 9. Caída del FS debido a la bajada de las tensiones efectivas y de la presión de confinamiento

A lo largo del hidrograma, los momentos con mayor probabilidad para que se produzca el fallo de los taludes dependen de si se produce erosión en el pie de la orilla o no. Así, cuando no existen fenómenos erosivos, el momento crítico del talud se produce en la bajada del nivel de las aguas. En caso de producirse erosión, se originan fallos en el talud tanto en la subida como en la bajada de aguas si bien los colapsos más importantes se concentran en las cercanías del pico del hidrograma tanto en el tramo de subida como de bajada (Rinaldi y Darby, 2008).

La toma en consideración de la matriz de succión (presiones negativas en la banda capilar saturada y la zona no saturada del suelo) en el análisis de estabilidad se deja en manos del técnico que realice el estudio. Al ser un parámetro que mejora la estabilidad, a la hora de incluirlo en la expresión del FS se deberá tener la suficiente seguridad de la permanencia de su efecto con el tiempo.

En relación al uso de los parámetros resistentes en términos efectivos o totales (análisis en tensiones efectivas o totales, condiciones drenadas y no drenadas respectivamente), se puede utilizar el valor del coeficiente de permeabilidad como criterio diferenciador. En suelos con permeabilidad mayor de  $10^{-4}$  cm/s se realizará el análisis en términos efectivos realizándose el análisis en términos totales para los demás casos. En caso de existir materiales de distinta permeabilidad se combinarán los dos anteriores tipos de análisis para representar adecuadamente el distinto comportamiento de los suelos existentes.

En particular, para las fases de bajada del nivel de aguas, se recomienda el análisis en tres etapas planteado por Duncan *et al* (1990).

## 5. Simulación de técnicas y actuaciones

Para el análisis de estabilidad de las orillas y la incorporación de los efectos de las distintas técnicas de protección y estabilización, se emplean métodos mejorados de compatibilización de deformaciones entre el suelo y el refuerzo (Guillermo Tardío, 2011).

Los aumentos del valor de la tensión crítica debido a las técnicas de estabilización pueden obtenerse de estudios similares, bibliografía o valores ofrecidos por las casas comerciales.

La metodología propuesta es útil de cara a determinar la extensión necesaria de las actuaciones en sentido transversal y longitudinal.

Para la simulación del efecto de las raíces se recomienda el uso de métodos que incorporen el efecto de rotura progresiva de las raíces (por ejemplo, Fiber Bundle Models) (Pollen y Simon, 2005).

## DISCUSIÓN

Se indica mediante un diagrama de flujo la secuencia de pasos a seguir para la implementación de la metodología propuesta. Se ha desglosado los pasos para el caso de caudal genérico de avenida "2".

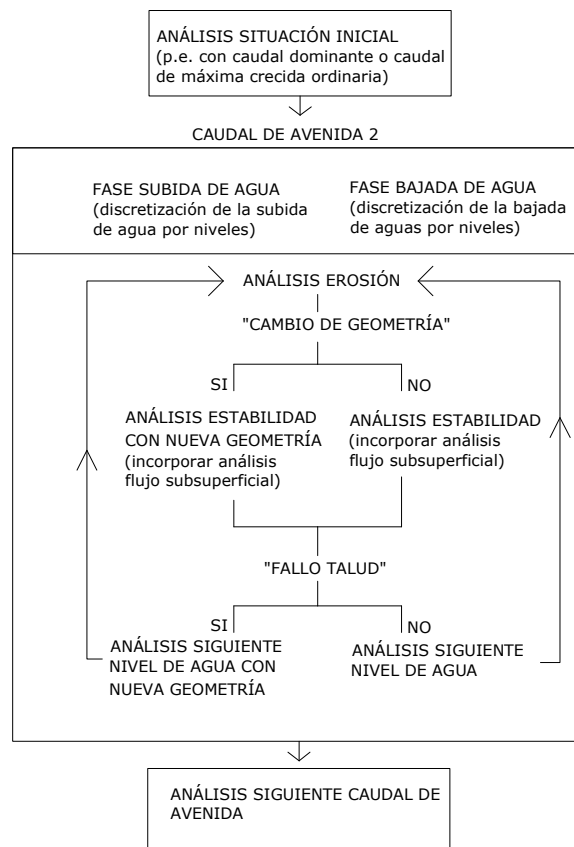


Figura 10. Flowchart de la metodología propuesta

En caso de contar con datos históricos, al anterior esquema habría que añadirle fases de comprobación de distintas funciones de transporte, fases de calibración, validación y análisis de sensibilidad.

A continuación se muestra una imagen con resultados parciales de la aplicación de la metodología propuesta



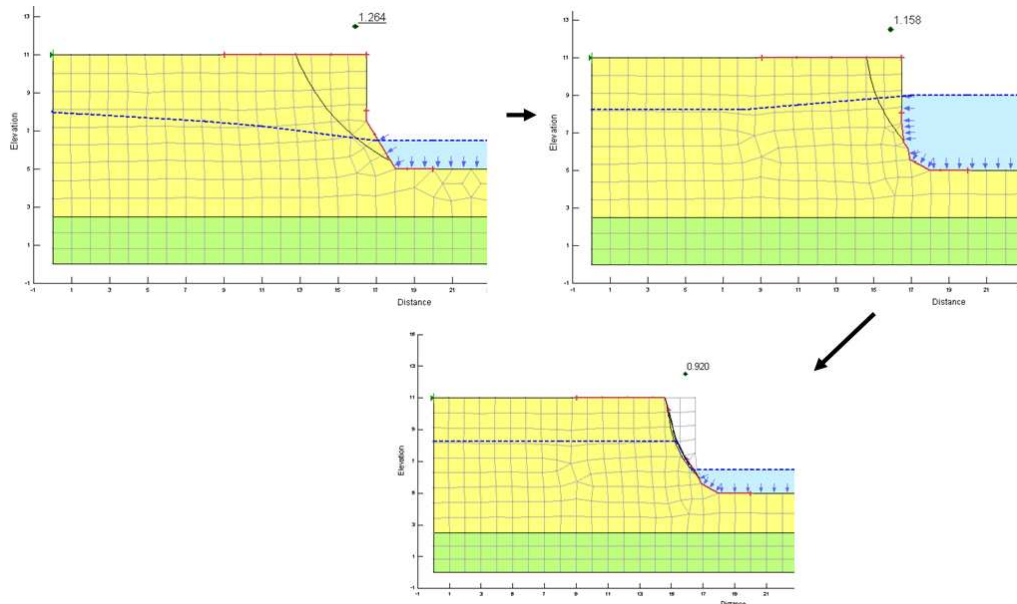


Figura 11. Algunas fases de la evolución de una orilla

## CONCLUSIONES

En los estudios que actualmente se realizan existe una falta de interrelación entre el análisis de erosión de las orillas y el análisis de su estabilidad que conlleva una limitada simulación del comportamiento real. Esto puede dar lugar a una incorrecta selección de las técnicas a emplear que, en muchos casos, tiene consecuencias tanto ambientales (obras sobredimensionadas, excesiva rigidez estructural, ocupación inadecuada del suelo disponible,...) como económicas (presupuestos desmesurados no ajustados a las necesidades).

Con la metodología propuesta es posible analizar la dinámica de las orillas comprobando la variación de su geometría tanto transversal como longitudinal debida a la erosión para distintos caudales de avenida y para diferentes secuencias de avenidas.

También posibilita avanzar en el conocimiento de los factores y condiciones que determinan una correcta selección y un buen rendimiento de las distintas técnicas de estabilización y protección de las orillas (incluyendo las técnicas de bioingeniería).

Un estudio a gran escala, contando con series históricas de caudales, puede permitir:

1. Localizar zonas inestables y determinar la magnitud de los cambios.
2. Determinar bajo que condiciones son inestables el lecho o/y las orillas.
3. Investigar el momento y frecuencia de la anterior situación.

La aplicación de la metodología propuesta irá mostrando, con el tiempo, los puntos fuertes y débiles de este enfoque con la consiguiente mejora en nuestras capacidades para comprender y analizar las actuaciones de restauración fluvial.

Dada la importancia ambiental, económica y estratégica del tema y la necesidad de mejorar el conocimiento científico-técnico sobre la temática se insta a las distintas administraciones a apoyar proyectos de investigación en las líneas señaladas en este artículo.

Agradezco de antemano todas las críticas, comentarios y propuesta de modificaciones sobre el esquema planteado en este artículo.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco la revisión realizada por José Luis García (profesor de la ETSI Montes de Madrid), Fernando Magdaleno (CEDEX), José Carlos Carrasco (CEDEX) y José Luis Rubio (CSIC y Vicepresidente de la European Society for Soil Conservation). También agradezco a Dña. Ana Gómez Álvarez sus propuestas sobre la estructura del artículo.

## BIBLIOGRAFIA

A. BROOKES, F. D. SHIELDS JR. (eds.) 1996. River channel restoration: theory and practice. Wiley, Chichester, UK.

DUNCAN, J. M., WRIGHT, S. G. and WONG, K. S. 1990. Slope stability during rapid drawdown, *Proceedings of the H. Bolton Seed Memorial Symposium*, Mayo, Vol. 2, Págs. 253–272.

HANSON, G. J., 1990. Surface Erodibility of Earthen Channels at High Stresses. Part II - Developing an in-situ testing device. *Transactions of the ASAE*. Volume 33(1), Págs. 132-137.

KHODASHENAS, S. R., A. PAQUIER (1999). A geometrical method for computing the distribution of boundary shear stress across irregular straight open channels, *J. Hydraul. Res.*, 37, 381–388.

KNAPEN, A., J. POESEN, G. GOVERS, G. GYSSELS, J. NACHTERGAELE. 2007. Resistance of soils to concentrated low erosion: A review. *Earth Sci. Rev.* 80:75–109.

KONDOLF, G. M., H. PIÉGAY, N. LANDON. 2002. Channel response to increased and decreased bedload supply from land-use change: contrasts between two catchments. *Geomorphology* 45:35-51.

KONDOLF, G. M., M. W. SMELTZER, S. RAILSBACK. 2001. Design and performance of a channel reconstruction project in a coastal California gravel-bed stream. *Environmental Management* 28(6):761-776.

KRAHN, JOHN. 2004. Stability modelling with SLOPE/W. An engineering methodology. Geo-slope/W International Ltd. Págs. 315-319.

M. KLÖSCH, B. BLAMAUER, H. HABERSACK. 2009. Monitoring geometry and timing of riverbank failures during flood events. 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment.

J.P. MARTÍN VIDE, R.J.BATALLA, M. ROCA COLLELL, A. ROVIRA Y A. ANDREATTA, incisión, erosión transitoria y formas de fondo en los tramos medio y bajo del río Tordera. *Ingeniería del agua* · Vol. 12 · nº 1 marzo 2005. págs. 53-62.

POLLEN N, SIMON, A., 2005. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on streambank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research*, 41, W07025. doi: 10.1029/2004WR003801

RINALDI, M., CASAGLI, N., DAPPORTO, S., GARGINI, A., 2004. Monitoring and modelling of pore water pressure changes and riverbank stability during flow events. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(2), 237-254.

RINALDI, M., DARBY, S.E. 2008. "Modelling river-bank-erosion processes and mass failure mechanisms: progress towards fully coupled simulations." In *Gravel Bed Rivers VI – from process understanding to river restoration*. editado por H. Habersack, H. Piégay and M. Rinaldi, páginas 703-737, Amsterdam.

SHIH-WEI CHIANG, TUNG-LIN TSAI, JINN-CHUANG YANG. 2010. Conjunction effect of stream water level and groundwater flow for riverbank stability analysis. *Environmental Earth Sciences*. Springer-Verlag 2010

SKEMPTON, A. W. (1964). Fourth Rankine Lecture: Long-term stability of clay slopes. *Gkotechnique* 14, No. 2, pags. 77-101.

TARDÍO CERRILLO, GUILLERMO. 2011. Nueva metodología para incorporar el anclaje de las raíces en el análisis de estabilidad de taludes. *Revista Montes*. Nº 115.