

Experiencia en el Diseño de Autovías en Rumanía. Metodología Aplicada en Estudios Hidrológicos e Hidráulicos



Experience in the Design of
Highways in Romania.
Methodology used in Hydrologic
and Hydraulic Studies

Jose María Moure Tribaldos / Leocadio Sánchez Rodrigo
Dpto. Hidrología, Hidráulica y Drenaje. Transportes – Diseño

Resumen

El aumento de inversión en países de Europa Central y del Este procedente de los fondos de la Unión Europea trae consigo la necesidad del estudio y aplicación de las normativas regionales, con la finalidad de llevar a cabo con éxito y en breves periodos de tiempo el diseño de los proyectos de infraestructuras lineales. El objeto de este trabajo es el análisis y optimización de la metodología aplicada en estudios hidrológicos e hidráulicos rumanos, y su comparación con los procedimientos habituales empleados en España.

A nivel hidrológico se analiza la metodología de cálculo de caudales punta, y concretamente la singularidad en la obtención del tiempo de concentración; asimismo se desarrolla un procedimiento para automatizar con herramientas GIS los cálculos de las variables más condicionantes. El estudio todas estas variables se realiza sobre las cuencas atravesadas por algunos tramos de autovía del Corredor IV Paneuropeo de transporte, así como en algunas de las carreteras nacionales existentes del entorno.

Del mismo modo, a nivel hidráulico se analiza tanto el dimensionamiento de viaductos como la obtención de la erosión estimada. En este caso, la muestra objeto de estudio es la intersección de los mismos tramos del Corredor IV Paneuropeo de transporte con los cauces más relevantes.

PALABRAS CLAVES: Hidrología, Autovía, Diseño de carreteras.

Abstract

The increase of investment in countries of Central and Eastern Europe, from the funds of the European Union, brings with it the need to study and implement of regional policies, in order to carry out, successfully and in short periods of time, the design of linear infrastructure projects. The purpose of this task is to analyze and optimize the methodology used in Romanian hydrologic and hydraulic studies, compared to the standard procedures used in Spain.

At a hydrological level the methodology of calculation of peak flows has been analyzed, specifically the uniqueness in obtaining the concentration time; also a method has been developed to automate the calculation of the more conditioning variables, with the help of GIS tools. A study of all these variables is done on the river basins crossed by some sections of Corridor IV Pan-European Transport Motorway, and also in some of the existing national roads in the surrounding.

For the same reason and at a hydraulic level, both the dimensioning of viaducts as well as the estimated erosion has been analyzed. In this case, the scope of the study is the intersection of Corridor IV Pan-European Transport Motorway, with the most relevant river-basins.

KEYWORDS: Hydrology, Highway, Road Design.

1. Análisis hidrológico

La aplicación del método hidrometeorológico rumano en la obtención de caudales depende, como es habitual en este tipo de cálculos, de la determinación del tamaño y naturaleza de la cuenca aportante, y posteriormente de la aplicación de una intensidad media de precipitación a su superficie. En lo que respecta a la determinación de caudales punta, la metodología rumana se centra en cuencas menores (de 5 ó 10 km²), admitiendo la aplicación de estos métodos hasta 20 ó 30 km² (este tamaño de cuenca ya la considera en general suficiente para albergar una red hidrométrica estándar). De este modo se obtiene el caudal punta mediante la siguiente expresión:

$$Q_{\max} = 16,67 \cdot C \cdot i_p \cdot F \quad (1.1)$$

Siendo:

C, coeficiente de escorrentía

i_p , intensidad de lluvia

F, superficie de la cuenca

Cabe destacar que el Organismo de Cuenca de Rumanía a nivel nacional, exige la solicitud formal del valor del caudal para puentes y viaductos hidráulicos, valor que debe ser empleado en el desarrollo de los cálculos hidrológicos. En este sentido esta metodología de cálculo de caudales sólo es admisible para su empleo en el dimensionamiento de obras de drenaje.

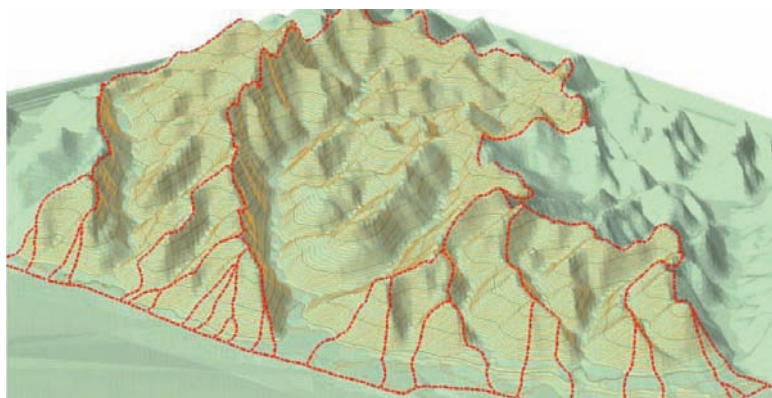


Figura 1: Vista 3d de algunas de las cuencas que han servido de base para este trabajo.

1.1. Singularidad paramétrica del método hidrometeorológico

Entrando en detalle en la fórmula presentada en el apartado anterior, la intensidad de lluvia se define como la relación entre el promedio máximo de lluvia asociada a la zona de estudio y del tiempo de concentración de la cuenca analizada. Es en la obtención de este último parámetro cuando se refleja una singularidad respecto a la metodología habitual manejada en España.

Este tiempo de concentración (t_c) es función del tiempo de concentración del cauce principal (t_a) y del tiempo de concentración asociado a las laderas de la cuenca (t_v):

$$t_c = 1,2 \cdot t_a^{1,1} + t_v \quad (1.2)$$

La obtención del tiempo de concentración del cauce principal (t_a) va ligada a parámetros como la longitud del cauce principal, la pendiente media de este cauce y el coeficiente de rugosidad del lecho. Sin embargo, el cálculo del tiempo de concentración asociado a las laderas de la cuenca (t_v) es algo más singular, ya que es el resultado de un procedimiento más laborioso en el que intervienen parámetros tales como la longitud media de la ladera, el coeficiente de rugosidad de la ladera y la pendiente media de la ladera. La optimización de este cálculo se desarrolla en el apartado

II.2.- Aplicación de métodos GIS para optimizar los cálculos.

Metodología utilizada versus métodos tradicionales españoles.

Se ha analizado la sensibilidad del parámetro tiempo de concentración en el desarrollo de la metodología rumana descrita en apartados anteriores. Se ha optado por comparar este procedimiento con el de Témez modificado, con amplia difusión en España, que se resuelve mediante la experiencia:

$$t_c = 0,3 \cdot \left[\frac{L}{J^{1/4}} \right]^{0,76} \quad (1.3)$$

Siendo,

L, longitud del cauce principal

J, pendiente media

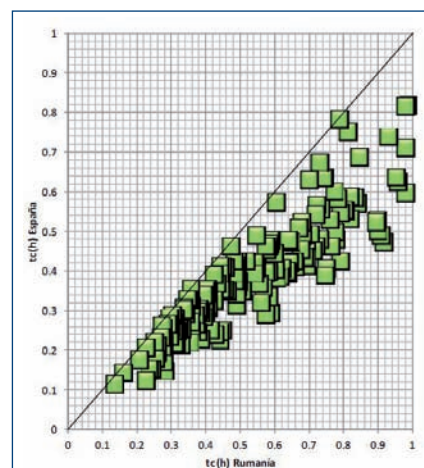


Figura 2: Comparativa de tiempos de concentración para rangos de entre 0,0 y 1,0 h.

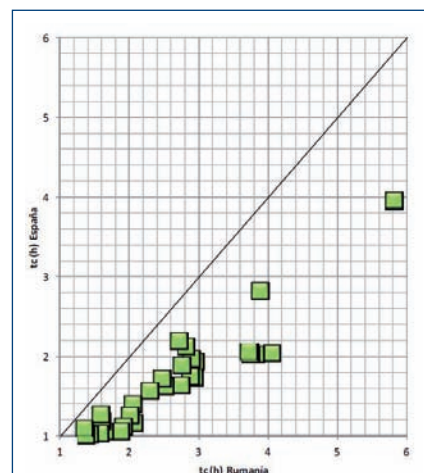


Figura 3 : Comparativa de tiempos de concentración para rangos de entre 1,0 y 6,0 h.

Se ha tomado como muestra de partida para el análisis realizado en este trabajo 228 cuencas asociadas bien a nuevas obras de drenaje de diferentes tramos de autovía del Corredor IV Paneuropeo, bien a obras de drenaje existentes en las carreteras nacionales del entorno (DN14, DN15 y DN15A). Los resultados de este análisis se han agrupado en dos rangos del tiempo de concentración, mostrando los resultados obtenidos a continuación:

En los gráficos de correlación obtenidos se evidencia que la aplicación de la normativa rumana conlleva a resultados del tiempo de concentración superiores a los de la norma española, siendo estos valores más próximos para los rangos más bajos de este parámetro, y presentando mayor diferencia a medida que se incrementa la duración.

1.2. Aplicación de métodos GIS para optimizar los cálculos

Como se comenta en apartados anteriores, el procedimiento más laborioso en el desarrollo de la metodología de cálculo de caudales es el parámetro correspondiente a la pendiente media de la ladera (I_v), que se resuelve mediante la siguiente fórmula:

$$I_v = \frac{AH}{2} \cdot \frac{\sum(L_v \cdot L_i + 1)}{F} \quad (1,4)$$

Siendo,

AH, desnivel de la cuenca de estudio

$\sum(L_v \cdot L_i + 1)$, suma de las longitudes de las curvas de nivel contenidas en la cuenca de estudio

F, área de cuenca de estudio

Obviamente, la suma de las longitudes de cada curva de nivel contenida la cuenca de estudio puede llegar a ser una labor excesivamente laboriosa si se pretende llevar a cabo de forma no automatizada. Para resolver este cálculo se ha optado por utilizar el software ESRI ArcGIS que contiene herramientas suficientes para resolver este tipo de cálculos.

Se analiza a continuación este



Figura 4: Vista 3d de algunas de las cuencas analizadas, en la que se destacan las curvas de nivel asociadas a una sola cuenca.

procedimiento de forma localizada en una de las cuencas objeto de estudio.

En primer lugar, se eliminan todas las curvas de nivel que se encuentren dentro de la divisoria objeto de estudio, cortando cada curva de nivel con el límite de la cuenca (herramientas clip e intersect).

En segundo lugar, añadimos una columna nueva tipo double en la al asociada a las curvas de nivel, y calculamos la longitud de cada línea (herramienta geometría). Finalmente la suma de todos los valores de este campo será el valor buscado $\sum(L_v \cdot L_i + 1)$.

Para tener un orden de magnitud de este parámetro final, se realiza un análisis partiendo de la muestra de datos definida en el apartado anterior, correspondiente al análisis de 228 cuencas. La suma de las longitudes de

las curvas de nivel contenidas en una cuenca media representativa resulta de 38 km. Como dato relevante a considerar, la suma total de las longitudes de las curvas de nivel de todas las cuencas analizadas en este trabajo supera los 8.000 km. En conclusión, parece necesaria la aplicación de métodos de automatización acordes con los plazos que se manejan en el desarrollo de estos trabajos.

2. Dimensionamiento hidráulico de viaductos

Se entiende por dimensionamiento hidráulico de viaductos el proceso de cálculo que establece la capacidad de desagüe de los mismos y la sobre-elevación producida por su implantación. Como resultado de este cálculo

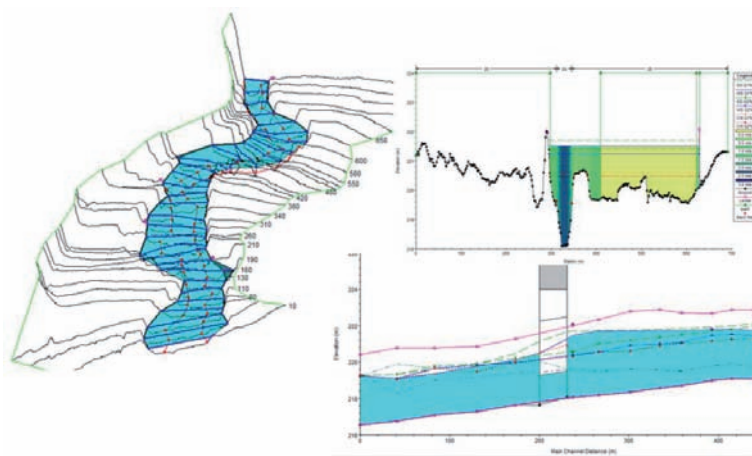


Figura 5: Algunas vistas de los modelos hidráulicos utilizados en el análisis.

se obtiene la longitud libre, medida ésta sobre el plano perpendicular a la corriente, y el gálibo o altura libre medida desde la cota inferior de tablero al nivel máximo del agua para el periodo de retorno considerado.

Para la obtención de los parámetros hidráulicos se ha empleado el ampliamente extendido software River Analysis System (HEC- RAS), desarrollado por U.S. Army Corps of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center (HEC), en régimen permanente, sobre alguno de los viaductos del Corredor IV Paneuropeo.

En el siguiente apartado se evalúa el procedimiento de cálculo recogido en la norma rumana y se realiza un análisis comparativo respecto de los procedimientos de cálculo utilizados en España.

2.1. Cálculo de la capacidad de desagüe

La metodología rumana es un proceso iterativo donde para cada una de las longitudes estimadas se obtiene una capacidad de desagüe del viaducto. La longitud final es aquella que da una capacidad de desagüe superior al caudal de cálculo para el periodo de retorno de proyecto.

La capacidad de desagüe para una determinada longitud de viaducto viene dada por la fórmula de Rühlmann:

$$Q = \mu \cdot L \sqrt{2g} \cdot \left[\frac{2}{3} [(\Delta z + K)^{3/2} - K^{3/2}] + h \sqrt{(\Delta z + K)} \right] \quad (2.1)$$

$$\Delta z = (V_{mp}^2 - V_m^2) / 2g \quad (2.2)$$

Siendo,

L, longitud estimada del viaducto

h, altura media del agua en presencia del puente

μ , coeficiente de reducción del área

Δz , sobre-elevación

K, altura cinética

V_{mp} , velocidad media en la sección del puente

V_m , velocidad media en régimen natural

Metodología utilizada versus métodos tradicionales españoles.

Esta metodología se compara con los métodos tradicionales utilizados en España. La primera comparativa se realiza con el procedimiento de cálculo recogido en la Instrucción 5.2IC que utiliza la siguiente fórmula para el cálculo de la sobre-elevación:

$$\Delta z = K \cdot V^2 / 2g \quad (2.3)$$

Siendo,

K, coeficiente de efecto de las pilas, excentricidad y esviaje del viaducto

V, velocidad media en la sección del puente

Para la segunda comparativa se toma la fórmula de Martín Vide con la que también se calcula la sobre-elevación:

$$\Delta z = 6 \cdot m^2 \cdot V^2 / 2g \quad (2.4)$$

Siendo,

m, coeficiente de obstrucción

V, velocidad media en la sección del puente

El análisis realizado se centra en las comparativas de las sobre-elevaciones por ser éste el único valor directamente comparable entre metodologías para una misma longitud de viaducto y caudal de cálculo. Las sobre-elevaciones que se muestran son las obtenidas partiendo de las longitudes libres

finalmente adoptadas en los cinco viaductos estudiados, a saber, Binis, Glavita, Cugir, Secas y Cioara.

Los valores de sobre-elevación obtenidos se presentan a continuación.

Se puede comprobar que dos de los valores de sobre-elevaciones obtenidos mediante la metodología rumana difieren respecto de los obtenidos mediante la metodología española. Esto es debido a que la fórmula que evalúa la sobre-elevación en la metodología rumana únicamente considera las alturas cinéticas antes y después de la implantación de la infraestructura, sin tener en cuenta la proporción de caudal obstruido o el efecto que pudiera producir la excentricidad y el esviaje del viaducto. Solo evalúa el efecto de las pilas de cara a obtener la capacidad de desagüe del viaducto (fórmula 2.1).

Esta es la principal diferencia entre metodologías; la metodología española se orienta a obtener valores máximos de sobre-elevación y la norma rumana está orientada a obtener capacidades de desagües, sin establecer valores límite de sobre-elevación, tal y como ocurre en la instrucción 5.2IC donde se fija un valor máximo de 0,50 m. Según lo anterior, la norma española resulta más restrictiva a la hora de fijar longitudes mínimas de viaductos. Por el contrario, la norma rumana sí establece valores mínimos de resguardo interior libre en función

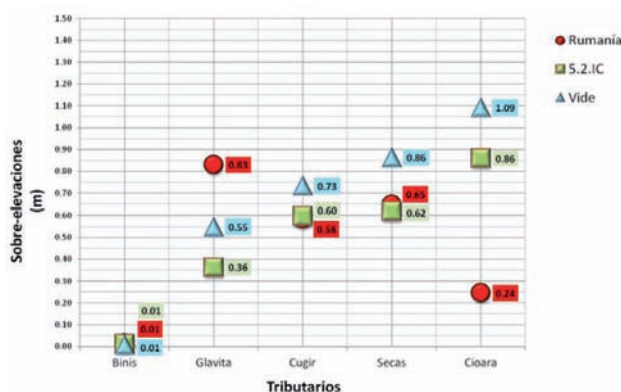


Figura 6 : Comparativa de sobre-elevaciones en la sección de aguas arriba de la infraestructura lineal.

de la importancia de la infraestructura, siendo en todos los casos estudiados superiores a 1 m.

3. Socavación en puentes

La erosión es el resultado de la acción erosiva producida por el flujo del agua, excavando y desplazando el material del lecho y márgenes del cauce y de alrededor de las pilas y estribos. Por un lado, la erosión general consiste básicamente en la reducción del lecho del cauce a lo largo de la sección hidráulica del puente. Esta socavación se produce como consecuencia de la contracción producida por el flujo al paso por la sección del puente. Por otro lado, la erosión local implica el desplazamiento del material existente alrededor de las pilas, estribos y taludes. Es el resultado de la aceleración del flujo y de los vórtices generados por la obstrucción al flujo.

La socavación en puentes se calcula, en caso de que los ríos tengan un lecho erosionable, de cara a establecer la profundidad de las cimentaciones y el tipo de protección necesario.

Analizada la erosión tanto en su componente general como en la local, se evalúa en todos los procedimientos partiendo de las hipótesis de flujo en lámina libre, aguas claras, cauce en equilibrio, y sin considerar el efecto del hielo ni posibles migraciones del cauce.

No se pretende en ningún caso

analizar el diseño de las cimentaciones, que requiere el trabajo de un equipo multidisciplinar de ingenieros geotécnicos, hidráulicos y estructurales, no siendo el objeto de este trabajo.

3.1. Estimación de la erosión general

La erosión general se produce cuando el área del flujo del cauce en el momento de la crecida se contrae, bien sea por una reducción natural del cauce o por la presencia de una estructura. También puede tener lugar este tipo de socavación cuando el flujo de la llanura de inundación se ve forzado a regresar al cauce de aguas bajas por la presencia de una mota de protección o, de forma más habitual, por los taludes de la infraestructura lineal próximos a los estribos.

Un descenso en el área del flujo supone un aumento de la velocidad media y del esfuerzo cortante sobre el lecho. En este sentido, hay un incremento en las fuerzas de socavación, lo que supone el desplazamiento del material del lecho en el tramo en el que se produce la contracción del cauce. El incremento del transporte del material del lecho aumenta la profundidad del cauce, incrementando el área de flujo, lo que reduce la velocidad y el esfuerzo cortante hasta que se recupera el equilibrio relativo.

La erosión general se obtiene de

las siguientes fórmulas:

$$h_{af} = V_{mp}/V_{ml} \cdot h = E \cdot h \quad (3.1)$$

$$e_g = h_{af\max} - h \quad (3.2)$$

Siendo,

e_g = socavación general

h , calado en la situación natural (previo a la erosión)

h_{af} calado después de la erosión

V_{mp} , velocidad media en la sección del puente

V_{ml} , velocidad media en régimen natural

$h_{af\max}$ máxima erosión general

Metodología utilizada versus métodos tradicionales españoles.

En este apartado se compara el procedimiento desarrollado en la normativa rumana con algunos métodos tradicionales definidos por diversos autores con cierta difusión en campo de la ingeniería española.

En primer lugar, se establece una comparativa de los valores obtenidos por la metodología rumana frente a los que se deducen por la fórmula de Blench. Este procedimiento se basa más en parámetros como el calado, el tamaño del material, la geometría del cauce y el caudal específico.

$$e_g = K \cdot \alpha \cdot y_c - y \quad (3.3)$$

Siendo,

e_g = socavación general

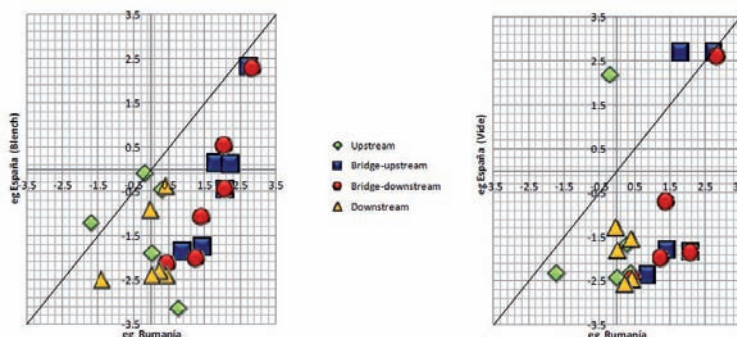


Tabla 9: Resultados de ensayo sensibilidad al agua del betón BBT 35/50, compactado por impacto y giratoria.

K, factor mayorante del calado

α , factor adimensional en función del material del lecho

y_c , calado crítico

y, calado en avenida

Por otro lado, se comparan los mismos valores de la metodología rumana con los valores obtenidos por el método de Martín Vide. En este caso los parámetros condicionantes son el caudal, el calado y la velocidad.

$$e_g = \delta \cdot y - y + k \cdot y_m - y \quad (3.4)$$

Siendo,

y, calado original

y_m , calado medio

δ , coeficiente de proporcionalidad

k, coeficiente de curva

Los datos de partida se obtienen de los modelos hidráulicos realizados de la intersección del Corredor IV Paneuropeo con 6 cauces: Bega, Timis Bega, Glavita-Bega, Secas, Cugir y Vaideu. El resultado de la comparación de metodología se muestra a continuación.

Aunque la muestra de datos analizada no es muy significativa, en los gráficos de correlación obtenidos se detecta que en la aplicación de la normativa rumana se obtienen valores superiores de la erosión general de los que cabe esperar con la aplicación de metodologías tradicionales en España.

Por otro lado, si bien es cierto que en los valores testigo (upstream / downstream) funcionan adecuadamente en todas las metodologías aplicadas, como cabría esperar con valores irrelevantes; sin embargo la aplicación de la normativa rumana en las secciones internas del puente presenta como norma general valores de la erosión general superiores a los obtenidos en las metodologías tradicionales empleadas en España.

3.2. Estimación de la erosión local

La erosión local en pilas es función de las características del material del lecho, de la configuración del mismo,

de las características del flujo y de la geometría de las cimentaciones:

- Material del lecho: granular o no granular, cohesivo o no cohesivo, erosionable o roca no erosionable.
- Flujo: velocidad y calado aguas arriba de las pilas, ángulo de incidencia de la velocidad de la corriente, y si el flujo discurre en lámina libre o en presión.
- Geometría de las pilas: tipo, dimensiones y forma. Los tipos pueden ser pilas únicas o múltiples (separación entre estas últimas), con o sin zapata o encepado, circulares o cuadradas, con extremos redondeados o angulosos, etc.

Para estimar la socavación local en pilas siguiendo la metodología rumana, se emplean las fórmulas expuestas a continuación, con sensibilidad a los parámetros de sección transversal de la pila, ángulo de incidencia y velocidad:

$$a_{f1} = 2,42 \cdot k_f \cdot k_a \cdot b \cdot \left[\frac{2v}{v_a} - 1 \right] \cdot \left[\frac{v_a^2}{g \cdot b} \right]^{1/3} \quad (3.5)$$

$$a_{f2} = 2,42 \cdot k_f \cdot k_a \cdot b \cdot \left[\frac{v_a^2}{g \cdot b} \right]^{1/3} \quad (3.6)$$

Siendo,

a_{f1} y a_{f2} , erosión local

k_f , coeficiente de forma

k_a , coeficiente de ángulo de incidencia

b, ancho de pila a nivel del lecho

v , velocidad actual aguas arriba de la pila

v_a , velocidad media de arrastre

g, aceleración de la gravedad

b, ancho de pila a nivel del lecho

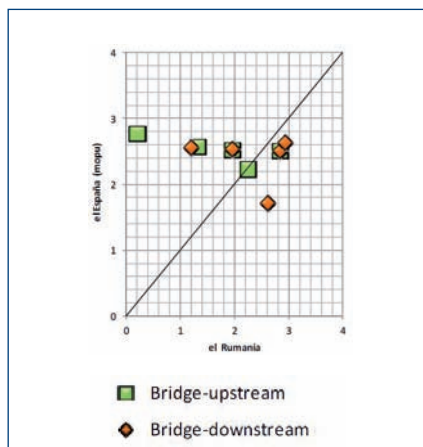


Figura 8: Comparativa de erosión local en las secciones internas del puente.

Metodología utilizada versus métodos tradicionales españoles.

Esta metodología se compara con los métodos tradicionales utilizados en España. Concretamente, se realiza la comparación con el procedimiento de cálculo indicado en la publicación del antiguo MOPU, que es función del ángulo de incidencia de la corriente, el ancho de pila y el calado.

El análisis realizado se centra en pilas de forma rectangular alargada y extremos redondeados. La muestra abarca 5 cauces (Bega, Timis Bega, Binis, Glavita –Bega y Secas), presentándose los resultados a continuación.

En lo que respecta a la erosión local, se observa bastante dispersión en los resultados obtenidos, obteniendo valores algunas veces superiores en la aplicación de la metodología rumana, y en otras ocasiones superior en el caso de las metodologías tradicionales españolas.

Referencias

[1] Instrucțiuni pentru calculul scurgerii maxime în bazine mici. INMH (1997)

[2] Instrucción 5.2-IC Drenaje Superficial. Ministerio de Fomento (1990)

[3] Normativ privind proiectarea hidraulică podurilor și podetelor. Administrația Națională a Drumurilor (2002)

[4] Versión modificada del método hidrometeorológico, presentada por su autor (J.R. Témez) en una comunicación al XXIV Congreso de la Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas (Madrid 1991), y reproducida en lengua castellana en el nº 82 de la Revista "Ingeniería Civil"

[5] Control de erosión fluvial en puentes. José R. Témez Peláez. MOPTMA (1988)

[6] Ingeniería de ríos. Juan Pedro Martín Vide. (2002)

[7] Evaluating Scour at Bridges, Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18). United States Department of Transportation - Federal Highway Administration (2001).❖