

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**MODELO FÍSICO PARA EL ESTUDIO DE LOS CRITERIOS DE RIESGO  
EN ZONAS URBANAS**

**Manuel Gómez<sup>1</sup>, Francesco Macchione<sup>2</sup>, Beniamino Russo<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>Grupo Flumen, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, [manuel.gomez@upc.edu](mailto:manuel.gomez@upc.edu)

<sup>2</sup>Laboratorio di Modellistica numerica per la Protezione Idraulica del Territorio (LAMPIT), Dipartimento di Difesa del Suolo, Università della Calabria, Rende (Cosenza), Italia, [f.macchione@unical.it](mailto:f.macchione@unical.it)

<sup>3</sup>Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia, Universidad de Zaragoza, La Almunia de Doña Godina, (Zaragoza) España, [brusso@unizar.es](mailto:brusso@unizar.es)

**RESUMEN:**

Las inundaciones en medio urbano son fenómenos que generalmente se caracterizan para su corta duración y para los efectos devastadores debido a la alta concentración de personas, viviendas y bienes localizados en estas áreas. En casos de inundaciones producidas por eventos de lluvias extremos, los caudales de escorrentía pueden circular por las calles de nuestras ciudades de forma incontrolada si el sistema de drenaje superficial o subterráneo es insuficiente generando condiciones de inseguridad para la circulación vehicular y peatonal. Con el fin de estudiar las condiciones de estabilidad de peatones en calles urbanas durante eventos de lluvia, se ha diseñado y realizado un modelo físico que reproduce una calle urbana en escala real. De acuerdo con las capacidades de laboratorio, el protocolo de ensayo establecido ha previsto caudales circulantes hasta 500 l/s y pendientes longitudinales de la calle hasta el 10%. Finalmente se han desarrollado 834 ensayos con 23 sujetos de riesgo en diferentes condiciones de visibilidad y se han recopilados todas las situaciones de riesgo registradas en tres grupos relacionados al nivel de riesgo ocurrido durante los ensayos: bajo, medio y alto riesgo. Los resultados obtenidos han evidenciado que para sujetos humanos entre 50 y 60 Kg, y calados entre 9 y 16 cm, velocidades de 1.5-2 m/s pueden suponer una pérdida de estabilidad por efecto de fenómenos como vuelco y deslizamiento.

**ABSTRACT:**

Urban floods are sudden phenomena normally characterized by short flooding durations and devastating effects due to the high concentration of subjects, goods and properties located in urban areas. In these cases of flooding heavy and medium storms events (some times because of inadequate surface drainage systems) generate high uncontrolled amounts of surface runoff that circulate on the urban streets determining a significant hazard for the pedestrians and vehicles. With the aim of studying the stability of the pedestrians in urban areas during storm events, a model representing an urban street in a 1:1 scale, was designed and built. According to the laboratory capabilities a specific testing protocol was established. Specifically tests were carried out for different circulating flows (from 100 l/s to 500 l/s) and different longitudinal slopes (up to 10%). Finally 834 tests regarding 23 human subjects were carried out considering different light conditions too. Hazard conditions were classified into three groups: low, medium and high and parameters at which these conditions occurred were recorded. The obtained results showed that for a human subject with a weight between 50 and 60 Kg, and flow depths between 9 and 16 cm, velocities of 1.5-2 m/s can generate a loss of stability due to phenomena of dragging or overturning.

**PALABRAS CLAVES:**

Modelo físico, flujo en calle, criterios de riesgo.

## INTRODUCCIÓN

El problema de las inundaciones representa el desastre natural más común en Europa, y, en términos económicos, el más crítico. En total, en el siglo XX, el 12% de las víctimas por desastre naturales (alrededor de 93.000) se debió a inundaciones.

Además, más de la mitad de la población del planeta y en particular la de España vive en aglomeraciones urbanas. El crecimiento del número de ciudades, del tamaño de las mismas, las elevadas condiciones de impermeabilidad y en algunos casos la climatología irregular, con tormentas intensas en periodos de tiempo cortos, genera cada año un rosario de problemas de inundación que si bien son pequeñas en extensión (pocos Kilómetros cuadrados), tienen una gran repercusión entre los ciudadanos y suponen cuantiosos daños materiales dado el elevado valor de los bienes que se almacenan en cualquier entorno urbano, y en ocasiones también de tipo humano. Granada en 2010, Santa Cruz de Tenerife en el año 2001, Cambrils en 2002, Alicante 1999 y otras muchas poblaciones de la costa mediterránea son ejemplos de sitios donde se han producido cuantiosos daños materiales acompañados de pérdidas de vidas humanas.

Una directiva específica sobre la evaluación y la estimación del riesgo asociado a inundaciones ha sido aprobada por el Parlamento Europeo en el 2007 con el objetivo de establecer un marco para la estimación del riesgo hidráulico en casos de inundaciones (Directiva 2007/60/EC)

En base a esta Directiva, todos los Estados Miembros deberán identificar las áreas potencialmente inundables y representar la peligrosidad y el riesgo hidráulico en mapas específicos antes del diciembre del 2011. Según el espíritu de la Directiva estos mapas pueden representar una herramienta muy valiosa a la hora de estimar y evaluar el riesgo hidráulico relativo a inundaciones.

Actualmente existe un cierto acuerdo en literatura sobre el hecho que el riesgo hidráulico asociado a escorrentía urbana sea básicamente asociado a los parámetros del flujo calado ( $y$ ) y velocidad ( $v$ ) y muchos autores han proporcionado, en el curso de los últimos años, algunas expresiones que evalúan el grado de peligrosidad del flujo en función de uno de estos parámetros o de la combinación de los dos (Abt et al., 1989; Reiter, 2000; Kelman, 2002). En muchos de estos casos la peligrosidad del flujo se define como la condición necesaria para que ocurra un fenómeno de vuelco o deslizamiento del peatón por efecto del flujo.

Muchos de estos estudios proponen una condición de seguridad para los adultos dada por el producto entre estos dos parámetros (calado x velocidad) (entre 0.5 y 1 dependiendo del estudio), pero en la gran mayoría de los casos, las expresiones propuestas se refieren a flujos en cauces o llanuras de inundación por lo cual no son muy adecuadas para caracterizar la peligrosidad del flujo en el medio urbano cuando las inundaciones se producen por el efecto combinado de la escorrentía superficial y de los caudales excedentes del sistema de drenaje en carga. Sin embargo, por lo dicho anteriormente, las inundaciones en medio urbano, independientemente de las causas que las generen, son las que más interesan, desde un punto de vista de prevención, por el alto grado de peligrosidad debido a la alta concentración de personas y bienes.

No obstante todas las inundaciones en medio urbano se caracterizan por un alto grado de peligrosidad por la alta vulnerabilidad del territorio, está claro que hay que diferenciar, por cada tipo de inundación, el análisis del riesgo hidráulico en función de las características del flujo. De hecho en caso de inundaciones producidas por desbordamiento de un río, el flujo suele caracterizarse por tener altos calados (del orden de los metros) y bajas velocidades (hasta 1-2 metros por segundo), mientras en caso de inundaciones producidas por eventos de lluvia extremos (generalmente eventos de lluvia convectivos u orográficos), las inundaciones son mucho más

rápidas por efecto de las superficies poco rugosas y el alto grado de impermeabilidad con un flujo que circula descontrolado por las calles urbanas de nuestras ciudades con calado de pocos centímetros pero con velocidades hasta de 3÷4 metros por segundo. Además si se consideran estudios teóricos desarrollados por Nanía (1999), es posible observar que el fenómeno del deslizamiento para peatones por efecto del flujo en calle es directamente proporcional al calado del flujo mientras resulta proporcional al cuadrado de la velocidad que es un parámetro muy crítico, por lo dicho anteriormente en medio urbano.

En este artículo se presentan, después de haber analizado el estado del arte de los criterios de riesgo asociados a escorrentía urbana más empleados a nivel mundial, los resultados de una campaña experimental para hallar velocidades críticas en calles urbanas durante eventos de lluvias extremos.

El objetivo de esta campaña ha sido lo de colmar un déficit en este campo, debido al hecho que, hoy en día, no existe ningún criterio de riesgo asociado a inundaciones urbanas, que limite la velocidad máxima independientemente del calado o para calados del orden de la altura del bordillo que es la condición habitual en casos de inundaciones producidas por efecto del exceso de escorrentía superficial circulante en calles urbanas durante episodios de lluvias extremos.



**Figura 1.-** Problemas de estabilidad de los peatones en situaciones de inundaciones en calle urbanas.

Por todo lo dicho anteriormente, hoy en día es habitual definir el nivel de seguridad de una calle durante un suceso de lluvia con un determinado periodo de retorno, a través de los valores máximos de dos parámetros significativos del flujo (o a través de un valor límite de un parámetro combinado entre los dos):

- Calado máximo ( $y_{\max}$ )
- Velocidad máxima del flujo ( $v_{\max}$ )

Cada Administración Pública tiene el deber de fijar un nivel de seguridad para sus calles urbanas durante eventos de lluvias extremos. Para hacer eso, generalmente se hace referencia a eventos de lluvias con un determinado periodo de retorno, y se fijan, para ese suceso, los valores máximos de calado y velocidad.

Los parámetros máximos del flujo para un determinado evento de lluvia constituyen el parámetro de diseño básico para el cálculo de los espaciamientos entre los elementos de captación de cualquier zona urbanizada. Es obvio que más restrictivos serán los parámetros de riesgo, mayor será la inversión en elementos de captación (a menor calado máximo y velocidad máxima corresponden pequeños espaciamientos entre imbornales). La ciudad de Barcelona, por ejemplo, diseña los sistemas de captación de todo el término municipal sobre la base de dos criterios de riesgo muy restrictivos asociados a la lluvia de proyecto con periodo de retorno de 10 años:

- Calado máximo  $y_{max}$ : 0.06 m
- Velocidad máxima  $v_{max}$ : 1.5 m/s

El primer valor se justifica por el hecho de considerar inundable, durante una lluvia con periodo de retorno de 10 años, los carriles laterales de circulación de las avenidas principales (normalmente de ancho 3 metros y con bombeo transversal del 2%), mientras el segundo límite es un valor adoptado sobre la base de la experiencia y al considerar demasiado restrictivo, por las superficies poco rugosa del medio urbano, el valor propuesto por Témez para zonas inundables (1 m/s) (véase párrafo siguiente).

## ESTADO DEL ARTE DE CRITERIOS DE RIESGO EN MEDIO URBANO

En muchos países, el valor máximo del calado coincide con aquel valor que no permita el ingreso del agua pluvial en los comercios o viviendas particulares (CCRFCD, 1999; CADPW, 1977; Gómez, 2008).

A continuación se propone una tabla (Tabla 1) de resumen de los valores de máximo calado encontrados en la bibliografía a nivel mundial con algunas informaciones sobre la tipología y el ámbito del estudio. Hay que decir que muchos de estos criterios se refieren a inundaciones en cuencas naturales, al tránsito de avenidas en cauces o a desbordamiento de ríos en las llanuras de inundación.

**Tabla 1.-** Criterio de riesgo de calado máximo: referencias a nivel mundial.

Fuente	Referencia	$y_{max}$ (m)	Justificación del criterio	Ámbito de estudio
Manual de Drenaje de la Ciudad de Denver (EEUU)	Wright-Mc Laughlin, 1969	0.45	Altura máxima próxima al límite a partir del cual un vehículo empieza a perder adherencia con el pavimento y flotar en el agua	Urbano
Monografía Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (España)	Témez, 1992	1.00	Altura máxima para una situación de peligro para individuos en cauces naturales y llanuras de inundación	Rural
Manual de Drenaje del Contado de Clark (EEUU)	CCRFCD, 1999	0.30	Altura máxima para garantizar que la escorrentía no sobrepase el bordillo	Urbano
Criterio de Mendoza (Argentina)	Nanía, 1999	0.30	Altura máxima para evitar el ingreso de agua pluvial en viviendas y comercios	Urbano
Consejo para la Agricultura y la Gestión de los Recursos (Australia y Nueva Zelanda)	ARMC, 2000	1.20 – 1.50	Este criterio no se refiere sólo a la estabilidad de los individuos sino también a los daños generales que esta altura de inundación puede provocar.	Urbano
Riesgos hidro-meteorológico (Suiza)	Belleudy, 2004	0.00 - 1.00	Este criterio propone varios calados máximo en función del uso del suelo y se refiere a inundaciones provocadas por desbordamiento de ríos	Urbano / Rural
Picba06: Plan Integral de Alcantarillado de Barcelona 2006	CLABSA, 2006	0.06	Para una lluvia con periodo de retorno de 10 años, tener los dos carriles laterales inundados dejando el resto de la calzada despejado	Urbano

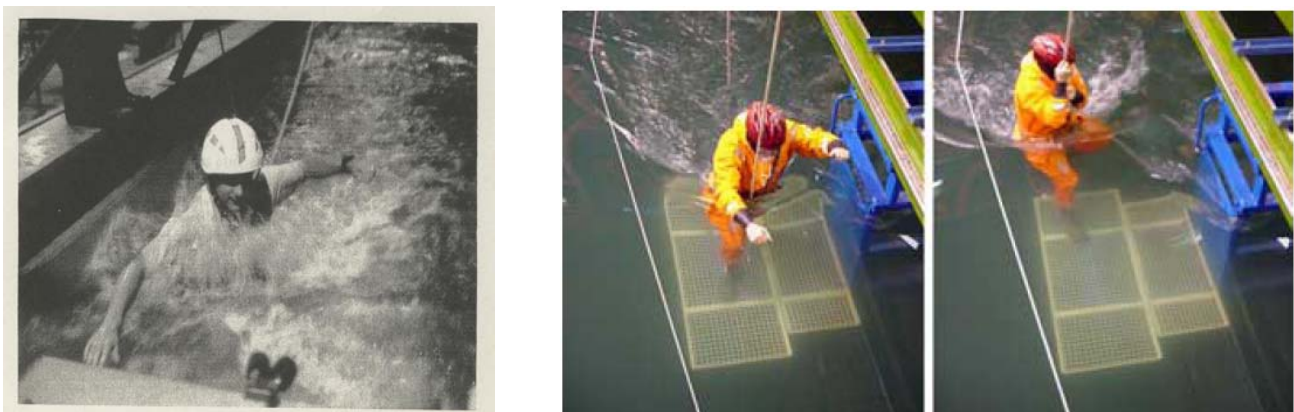
En relación a los criterios asociados a velocidades máximas con independencia del calado, el estado del arte actual ofrece aún menos referencias que en el caso anterior. Existen estudios, desarrollados

para contextos rurales, como el de Témez (1992), que proponen una velocidad límite de 1 m/s. Es evidente que este valor resulta absolutamente inadecuado para estudiar el comportamiento hidráulico en calles y para que se utilice como parámetro de diseño de los sistemas de captación. Como se hizo para el criterio del calado máximo, a continuación se presenta una tabla parecida (Tabla 2) sobre el criterio de riesgo de velocidad máxima con algunas referencias encontradas en la literatura técnica.

**Tabla 2.-** Criterio de riesgo de velocidad máxima: referencias a nivel mundial.

Fuente	Referencia	$V_{m\acute{a}x}$ (m/s)	Justificación del criterio	Ámbito de estudio
Monografía Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (España)	Témez, 1992	1.00	Velocidad límite para que un individuo pueda vencer a nado la resistencia del flujo	Rural
Consejo para la Agricultura y la Gestión de los Recursos (Australia y Nueva Zelanda)	ARMC, 2000	1.50	Velocidad límite, para calados pequeños, que supone la pérdida de capacidad por parte de un individuo de caminar por el agua	Urbano
Riesgo hidrometeorológico (Suiza)	Belleudy, 2004	0.25 - 1.00	Este criterio propone varias velocidades máximas en función del uso del suelo y se refiere a inundaciones provocadas por desbordamiento de ríos	Urbano / Rural

Muchos autores proponen criterios basados sobre la consideración conjunta de los calados y velocidades del flujo. Algunos de ellos proponen resultados hallados a través de estudios experimentales basados sobre el análisis de estabilidad de peatones frente a corrientes de flujo en canales. De hecho el flujo ejerce sobre los peatones que deben cruzar calles o circular por vías peatonales, una fuerza y un momento que pueden provocar fenómenos de deslizamiento, arrastre y vuelco. También en este caso, los modelos utilizados en los estudios analizados, en general no han tenido en cuenta el perfil real de las calles (aceras, calzadas con bombeo, etc.) proporcionando resultados más útiles para medio rural y cauces naturales que para medio urbano (Abt *et al.*, 1989; Reiter, 2000) (Figura 2).



**Figura 2.-** Algunas experiencias experimentales sobre la estabilidad humana en canales (Abt *et al.*, 1989; ARMC, 2000).

Otros estudios han abordado el problema bajo un punto de vista teórico (Abt, 1988; Nanía, 1999) considerando un cierto grado de aproximación en el uso de diferentes coeficientes de seguridad y de formas. En la Tabla 3 se presenta un cuadro resumen de las referencias encontradas a nivel mundial sobre criterios de riesgo basados en la consideración conjunta de los calados y velocidades del flujo en medio urbano.

**Tabla 3.-** Criterios de riesgo basados en la consideración conjunta de calados y velocidades.

Fuente	Referencia	$v \cdot y$ ( $m^2/s$ )	$v^2 \cdot y$ ( $m^3/s^2$ )	Justificación del criterio	Ámbito de estudio
Agencia Federal Americana para la Gestión de Emergencias (EEUU)	FEMA, 1979	0.56	-	El valor del producto representa la condición límite a partir de la cual un peatón adulto empieza a perder estabilidad (el estudio argumenta que para niños este producto bajaría sensiblemente) límite representa el comienzo	Urbano / Rural
Estudio sobre la estabilidad humana en zonas de riesgo (EEUU)	Abt, 1999	0.70 - 2.12		Los valores del producto límite $v \cdot y$ , hallados a través de test experimentales, varían dependiendo de la altura y del peso de las personas (a mayor producto peso por altura, mayor estabilidad)	Urbano / Rural
Monografía Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (España)	Témez, 1992	0.50	-	Altura máxima para individuar una situación de peligro para individuos en cauces naturales y llanuras de inundación	Rural
Manual de Drenaje del Contado de Clark (EEUU)	CCRFCD, 1999	0.55	-	Altura máxima para garantizar que la escorrentía no sobrepase el bordillo de la acera	Urbano
UPC (España)	Nanía, 1999	-	1.00	Estudio teórico de la estabilidad de un peatón frente al fenómeno del deslizamiento	Urbano
Proyecto Europeo RESCDAM (Finlandia)	Reiter, 2000	0.25 - 0.70		Este criterio se refiere a experiencias experimentales. Los dos valores presentados se refieren a pérdida de estabilidad frente al flujo para individuos adultos y niños	Rural
Curso de Hidrología Urbana (España)	Gómez et al, 2008	0.45	-	Estudio teórico de la estabilidad de un peatón frente al fenómeno del vuelco	Urbano

Gran parte de los criterios de riesgo sobre la consideración conjunta de calados y velocidades, han sido desarrollado para cuencas rurales y considerando inundaciones provocadas por desbordamiento de ríos. En los casos de considerarse inundaciones en medio urbano, los modelos no han previsto secciones de calles urbanas (con aceras, bordillos, bombeos, etc.), limitándose a desarrollar los tests experimentales en canales artificiales que no representaban muy bien la situación real de las calzadas de nuestras ciudades. Es por todo eso, entonces, que ha resultado necesario producir un esfuerzo ulterior de investigación, dirigido al campo del drenaje urbano, para hallar criterios de riesgos para flujo en calles urbanas, que sirvan para un buen diseño de sistemas de drenaje superficiales que garanticen la seguridad de los ciudadanos y el normal desarrollo de las actividades urbanas durante precipitaciones extremas.

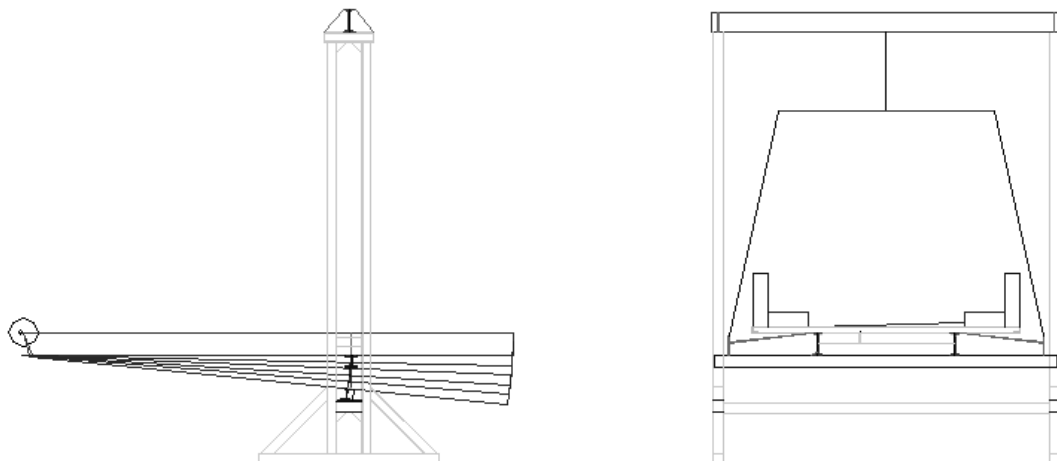
## MATERIALES Y METODOS

### Descripción del modelo

En el marco de un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia Español, y apoyado por la Fundación Agbar, el Grupo de Investigación FLUMEN de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), ha realizado una plataforma de ensayos para hallar criterios de estabilidad de individuos en condiciones de velocidades del flujo críticas. La idea ha sido simular, con la máxima precisión posible, una sección de calle a escala real (con aceras, bordillos, calzada con bombeo transversal, etc.) y reproducir, a través de varios ensayos, diferentes situaciones críticas al variar los caudales circulantes por la plataforma y las pendientes longitudinales de la misma.

Todas las experiencias similares desarrolladas hasta la fecha, se refieren a corrientes naturales en medio rural con calados altos (del orden de varios decímetros ó metros) y velocidades moderadas (1-2 m/s) y siempre considerando canales rectangulares (Abt *et al*, 1989; Reiter, 2000). El modelo, construido en el Laboratorio de Hidráulica de la UPC, reproduce fielmente una calle con bombeo

transversal del 2% (valor de normativa), mientras las pendientes longitudinales pueden variar hasta llegar al valor máximo del 10% (Figura 3).



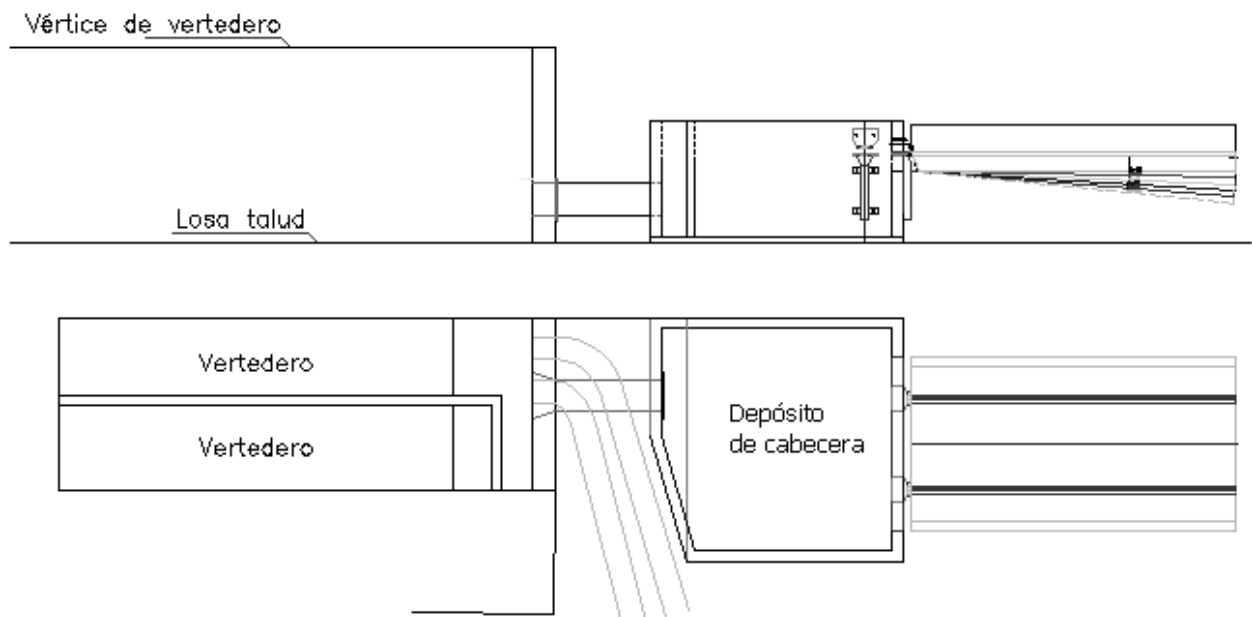
**Figura 3.-** Plataforma: perfil y sección.

El modelo se alimenta a través de un sistema de impulsión formado por tres bombas cuya capacidad máxima es de 500 l/s. El agua antes de llegar a la plataforma, alcanza un depósito de carga conectado a través de dos válvulas eléctricas a dos canales paralelos dotados de vertederos triangulares. El caudal de ensayo está regulado a través de las válvulas, y además controlado por dos limnímetros situados aguas arriba de los aliviaderos. El esquema de funcionamiento del modelo se representa en la Figura 4, mientras el sistema de alimentación y los aliviaderos en las figuras 5 y 6.

Aguas arriba de la plataforma hay un pequeño depósito de cabecera para amortiguar la energía del flujo procedente del depósito de carga y proporcionar una entrada del flujo en la plataforma de la manera más uniforme posible (Figura 7).



**Figura 4.-** Esquema de funcionamiento de la plataforma.



**Figura 5.-** Sistema de alimentación del modelo. Perfil y planta.



**Figura 6.-** Aliviaderos triangulares para el control de los caudales circulantes en el modelo.



**Figura 7.-** Depósito de cabecera de la plataforma.

### Protocolo de ensayo

El objetivo de la campaña experimental durante los ensayos, fue la de reproducir, de la forma más real posible, el comportamiento de individuos al circular por calle urbanas inundadas y con



parámetros del flujo (calados y velocidades) potencialmente peligrosos. En particular el fin de la campaña ha sido lo de hallar velocidades límites para poder caracterizar el riesgo hidráulico asociado a este tipo de inundación en medio urbano.

Con este objetivo, 23 individuos (15 varones y 8 mujeres) entre 45 y 100 Kg y con alturas entre 1.54 y 1.82 m, han sido seleccionados para los ensayos. Cada ensayo consistió en circular por la plataforma (Figura 8) perpendicularmente, paralelamente y diagonalmente al flujo.



**Figura 8.-** Individuo durante un ensayo (Caudal de circulación de 300 l/s y pendiente longitudinal del 6%).

Cada individuo repitió el ensayo para todas las pendientes longitudinales y todos los caudales circulantes hasta alcanzar el valor máximo de 500 l/s (con incrementos progresivos de 100 l/s) o al no poder terminar correctamente el ensayo debido a las condiciones del flujo.

Las pendientes longitudinales ensayadas y los diferentes caudales circulantes se representan a continuación:

$I_y$ : 2%, 4%, 6%, 8%, 10%

$Q$ : 100 l/s, 200 l/s; 300 l/s; 400 l/s; 500 l/s.

Los ensayos se repitieron en condiciones de visibilidad óptimas y en condiciones de visibilidad limitadas obligando los individuos a circular con gafas especiales. Los ensayos se desarrollaron en superficies de hormigón con rugosidad muy próxima a las de las calles urbanas y no se consideraron efectos de transportes de sedimentos o efecto de debris-flow.

Además de considerar las velocidades límites relacionadas a claras condiciones de riesgo alto (high hazard), también se definieron las condiciones de riesgo medio (medium hazard) y de riesgo leve (low hazard). En particular para caracterizar el nivel de riesgo asociado a las condiciones del flujo y al comportamiento de cada individuo, se han considerado las siguientes situaciones.

#### *Condiciones de riesgo alto (high hazard conditions)*

- El individuo presentaba claros síntomas de inestabilidad (por ejemplo el individuo no podía permanecer estable estando parado de pie o circulando por la plataforma o había sido arrastrado por el flujo, etc.)
- El individuo presentaba clara pérdida de maniobrabilidad (por ejemplo el individuo no podía acabar el protocolo de ensayo correctamente sin agarrarse a los cables de seguridad, etc.)

#### *Condiciones de riesgo medio (medium hazard conditions)*

- El individuo mostraba significativas pérdidas de estabilidad (por ejemplo el individuo no podía moverse de forma correcta o hacía gran esfuerzo para permanecer estable)

- El presentaba pérdida significativa de maniobrabilidad (por ejemplo el individuo mostraba evidentes dificultades para acabar el ensayo)

*Condiciones de riesgo leve (low hazard conditions)*

- El individuo se agarraba de forma instintiva al cable de seguridad
- El individuo mostraba dificultades al entrar al agua y bajar la acera
- El individuo mostraba pequeños problemas de estabilidad al circular por la plataforma

## RESULTADOS

En total se desarrollaron 834 ensayos. Para cada condición de riesgo detectada (leve, media o alta) se han registrado los datos de caudal, calado, velocidad calculando también los parámetros  $v$  y  $v^2$  y relacionados a los criterios de seguridad al vuelco y al deslizamiento (Témez, 1992; Nanía, 1999). Finalmente se registraron, en condiciones de visibilidad óptima:

- 54 condiciones de riesgo leve
- 28 condiciones de riesgo medio
- 13 condiciones de riesgo alto

mientras para condiciones de visibilidad limitada se registraron:

- 77 condiciones de riesgo leve
- 40 condiciones de riesgo medio
- 16 condiciones de riesgo alto

Con todos los datos correspondientes a las situaciones de riesgo, se ha calculado el percentil 95-ésimo de las velocidades para riesgo alto, medio y leve, resultando que para clasificar los umbrales entre las varias zonas de riesgo pueden utilizarse los siguientes valores:

- *Riesgo alto:*  $v > 1.88 \text{ m/s}$
- *Riesgo medio:*  $1.56 \text{ m/s} < v < 1.88 \text{ m/s}$
- *Riesgo leve:*  $1.51 \text{ m/s} < v < 1.56 \text{ m/s}$

Como mostrado por estos resultados, los niveles de riesgo medio y leve son muy similares. Además, las condiciones que definen estos niveles son mucho más subjetivas que las que corresponden a riesgo alto, por lo cual parece más oportuno organizar resumir estos tres resultados en la siguiente tabla (Tabla 4)

**Tabla 4.-** Criterios de riesgo para calles en caso de eventos de lluvias extremos..

Nivel de riesgo	Condición del flujo
<i>(calados entre 9 and 16 cm)</i>	
Alto	$v \geq 1.88 \text{ m/s}$
Moderado	$1.51 \leq v < 1.88 \text{ m/s}$
Leve	$v < 1.51$

Los parámetros de las condiciones del flujo asociados a riesgo alto se han comparado con los criterios de riesgo teórico de deslizamiento y vuelco (Témez, 1992; Nanía, 1999) en el caso de individuos con pesos de alrededor 50 y 60 Kg. Como se puede observar en la Figura 9, casi todos los puntos están por debajo de las gráficas de Nanía, mientras están siempre por encima de la de Témez, demostrándose que los criterios teóricos de estabilidad al vuelco y al deslizamiento son inadecuados para representar la realidad de la estabilidad de individuos durante inundaciones en medio urbano.

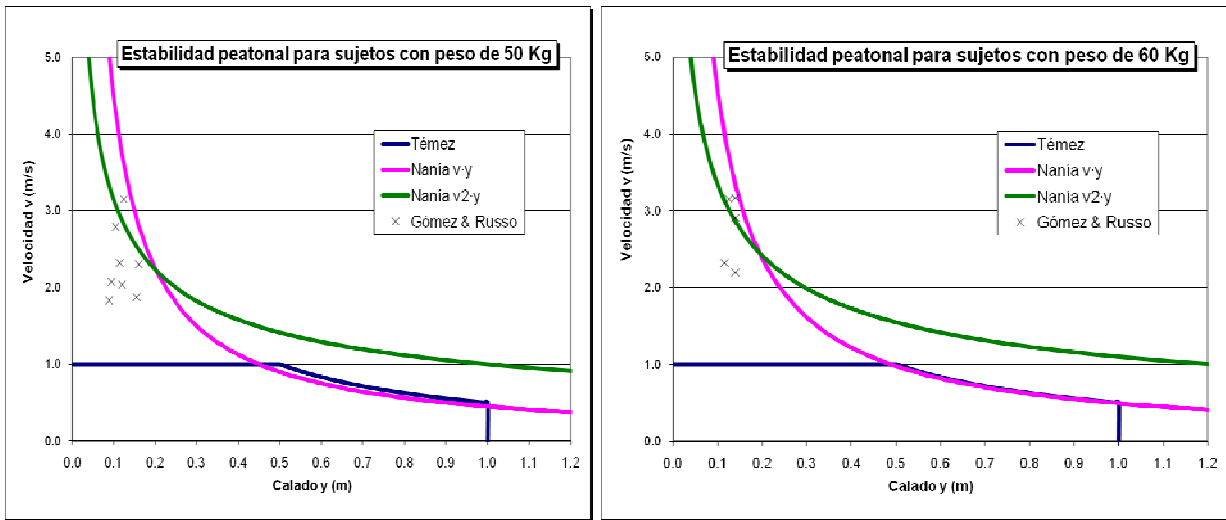


Figura 9.- Datos experimentales con algunos criterios de riesgo teóricos utilizados en España.

Finalmente los datos experimentales se han utilizado para encontrar una relación entre los parámetros críticos del flujo (parámetros relacionados a las condiciones de inestabilidad) y las características de los sujetos (peso total y altura). Sobre la base del estudio de Abt *et al.* (1989), se encontró una relación lineal entre la raíz el cuadrada del mínimo producto entre velocidad y calado, y el producto entre el peso total efectivo ( $P$ ) y la altura ( $H$ ) de los peatons (Figura 10). El coeficiente de correlación  $R^2$  para el ajuste propuesto es de casi 0.80 (bastante más alto que el coeficiente de correlación de Abt *et al.* 1989).

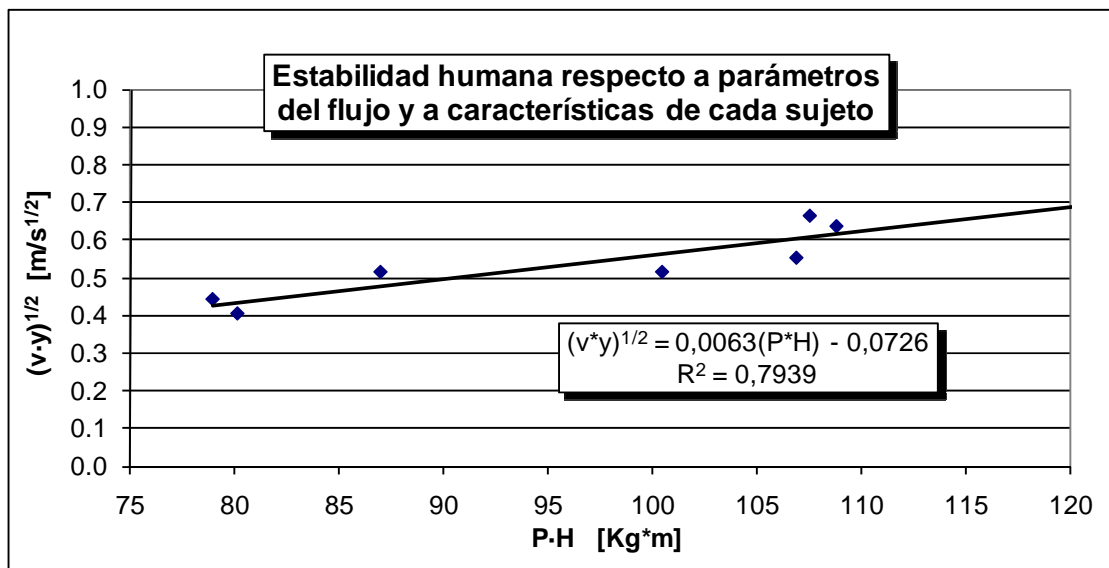


Figure 10: Ajuste para hallar las condiciones críticas del flujo en función del peso y la altura de un individuo.

A partir de la gráfica anterior es posible deducir la siguiente expresión para estimar, para cada individuo con un cierto peso y una cierta altura, cuales son las condiciones del flujo que determinan un nivel de riesgo alto para su estabilidad frente al flujo:

$$(v \cdot y)^{\frac{1}{2}} = 0.0063(P \cdot H) - 0.0726 \quad [1]$$

donde:

$v$  es la velocidad del flujo (in m/s)

$y$  es el calado (in m)

$P$  es el peso total del individuo (in Kg)

$H$  es la altura del individuo (in m).

## CONCLUSIONES

La seguridad de las actividades ciudadanas durante un suceso de lluvia, como el tráfico peatonal y vehicular, y la no inundabilidad de viviendas, es el objetivo principal que guía el diseño y funcionamiento de un sistema de drenaje. El nivel de riesgo para el flujo en calles urbanas se puede medir a través de dos parámetros del flujo: calado y velocidad. Determinados valores críticos de calado y velocidad, representan los parámetros de diseño para los sistemas de drenaje superficial. Hoy en día existen muchas referencias que limitan estos parámetros para flujo en medio rural y cauces naturales, mientras hay muy pocas experiencias en medio urbano que se puedan aplicar a un sistema de calle.

Este trabajo propone un estudio del estado del arte en este campo, proponiendo estudios teóricos y experiencias experimentales. Un completo análisis de las referencias encontradas, ha demostrado que hoy en día no existen experiencias que hayan tenido como objetivo el estudio específico del flujo en calles en zona urbana. Además el parámetro velocidad no ha sido suficientemente estudiado con respecto a calados pequeños típicos del medio urbano.

Con el objetivo de estudiar un criterio de riesgo que limitara las velocidades en medio urbano en caso de inundaciones producidas por escorrentía, se ha desarrollado una plataforma para ensayos sobre los criterios de estabilidad de individuos en condiciones de velocidades del flujo críticas.

Un detallado protocolo de ensayo ha sido elaborado para desarrollar una campaña experimental específica con el fin de obtener nuevos criterios de seguridad que se puedan aplicar en calles urbanas y representen adecuados parámetro de diseño para realizar eficientes sistemas de drenaje superficial.

Los resultados han puesto en evidencia que los criterios teóricos actualmente utilizados en España no son adecuados para garantizar la seguridad peatonal en casos de fuertes lluvias quedando casi siempre en el lado de la inseguridad con respecto a la realidad representada por los datos experimentales obtenidos durante esta campaña experimental.

Los datos experimentales han permitido hallar una expresión que permite estimar, para cada individuo con un cierto peso y una cierta altura, cuales son las condiciones del flujo que determinan un nivel de riesgo alto para su estabilidad frente al flujo.

## Referencias Bibliográficas

- Abt S.R. y Wittler R. J.** (1988). *Product Number Flood Hazard Concept-Verification Study*. Informe interno para el "Boulder Flood Utility". Boulder, Colorado, 32 pp. EE.UU.
- Abt S.R., Wittler R. J., Taylor A. y Love D. J.** (1989). *Human Stability in a High Flood Hazard Zone*. AWRA Water Resources Bulletin Vol. 25 N°. 4: 881-890, Agosto 1989.
- Agricultural and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ARMC)**, 2000. *Floodplain Management in Australia. Best Practice Principles and Guidelines*. SCARM Report 73, CSIRO Publishing.
- Belleudy P.** (2004). *Risques Hydro-météorologiques, crues et inondations / risque, aléa et vulnérabilité / DDS-TUE364/ 9*.
- Clark County Regional Flood Control District (CCRCD)** (1999). *Hydrological criteria and drainage design manual*. Contado de Clark, Estados Unidos.
- Clavegueram de Barcelona S.A. (CLABSA)**, (2006). *PICBA06, Plan Integral de Alcantarillado de Barcelona 2006*, Barcelona, España.

- Federal Emergency Management Agency (FEMA)**, 1979. *The floodway: a guide for community permit officials*. US Federal Insurance Administration, Community Assistance Series, N°.4, 1979. USA.
- Gómez M., Macchione F. y Russo B.** (2010). *Hazard criteria related to urban flooding produced by heavy storm events*. First European IAHR Congress. Edimburgo, Escocia.
- Gómez M.** (2008). *Curso de Hidrología Urbana (VII Edición)*. Grupo de Investigación FLUMEN. Escuela Politécnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
- Nanía L.** (1999). *Metodología numérico experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Barcelona, España.
- Reiter P.** (2000). *International methods of risk Analysis, Damage evaluation and social impact studies concerning Dam-Break accidents*. Helsinki PR Water Consulting, Finlandia.
- Russo B., Gómez M., Martínez P. y Sánchez H.** (2005). *Methodology to study the surface runoff in urban streets and the design inlets systems. Application in a real case study*. 10<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage. Copenhagen, Dinamarca.
- Témez Pelaez J. R.** (1992). *Control del desarrollo urbano en las zonas inundables*. En 'Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano'. Editores J. Dolz, M. Gómez, JP Martín. CICCIP Monografías. Madrid, España.
- Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD)** (1970). *Encroachment Lines, Resolution n° 11, Section 11.2*. Ciudad y Contado de Denver, Colorado. EE.UU.
- Wong S. W. y Moh Wung-Hee T.** (1997). *Effect of maximum flood width on road drainage inlet spacing*. School of Civil and structural Engineering, Nanyang Technological University, Nanyang Avenue. Water Science Tech. Vol. 36, N°. 8-9, pp.241-246.
- Wright-Mc Laughlin**, 1969. *Urban Storm Drainage Criteria Manual*. Urban Drainage and Flood Control District, Denver, Colorado, Estados Unidos.