

Cuantificación de caudales durante inundaciones urbanas aplicando LSPIV

Flow quantification during urban floods, applying LSPIV

Nicolás Federico Guillén,^{1,2}; Antoine Patalano^{1,2}; Matías Eder,¹; Alberto Grissetti,³; Carlos Marcelo García^{1,2}; Juan Carlos Bertoni,¹

¹CETA. Centro de Estudios y Tecnología del Agua - Universidad Nacional de Córdoba - Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

³Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Asunción, Paraguay

E-mail: nfguillen@hotmail.com

Recibido: 30.10.2015

Aceptado: 14.12.2015

Resumen: En los últimos años, la probabilidad de ocurrencia de inundaciones urbanas ha aumentado significativamente. Recientemente se han publicado diversos artículos científicos-técnicos relacionados a problemáticas específicas generadas por escurrimientos superficiales durante inundaciones urbanas como, por ejemplo, efectos nocivos sobre infraestructura urbana por anegamiento e impactos de altas velocidades de flujo sobre personas, calles y vehículos. La mayoría de los trabajos publicados se basan en investigaciones realizadas utilizando modelos numéricos y modelos físicos a pequeña escala (estos últimos presentan efectos de escala).

En este trabajo se presenta una metodología experimental para la cuantificación de caudales y velocidades de flujo durante inundaciones urbanas utilizando una nueva técnica de medición disponible en la actualidad para realizar mediciones de velocidades superficiales de flujo a gran escala (LSPIV por sus siglas en inglés). Además se propone adaptar esta tecnología para su implementación con videos digitales no profesionales, generalmente realizados por vecinos durante eventos de inundación utilizando distintos dispositivos electrónicos (teléfonos celulares, cámaras digitales, etc.). El método permite, a partir de las imágenes digitales registradas en estos dispositivos, calcular los campos superficiales de velocidad del flujo, la distribución transversal de velocidades, el caudal escurrido, etc. Los resultados que se presentan en este trabajo corresponden a diferentes inundaciones urbanas repentinas ocurridas en el área urbana del Gran Asunción, Paraguay (Arroyo Lambaré y otros). Finalmente se propone utilizar los resultados generados con las mediciones in situ para el diseño futuro de medidas estructurales y no estructurales requeridas para mitigar el riesgo hídrico.

Palabras clave: Inundaciones urbanas, LSPIV, Lambaré Py

Abstract: In the last years, the probability of occurrence of urban floods has increased significantly. Recently, scientists have published several articles related to specific problems generated by surface runoff during urban floods, as for example, harmful effects on urban infrastructure produced by

flooding and the negative impacts produced by the high flow velocities to people, roads and vehicles. Most published works are based on research based in numerical models and small scale physical models (the latter have scale effects).

The methodology used in this work, which preserves the safety of staff and the reliability of the measurements, consists in implementing large-scale particle image velocimetry (LSPIV). In addition it is proposed to adapt this technology for implementation with amateur digital videos, generally made by neighbors during flood events using different electronic devices (cell phones, digital cameras, etc.). The method allows, from digital images recorded in these devices, calculate the superficial flow velocity fields, the transverse velocity distribution, the flow discharge, etc. The results presented in this work correspond to different urban flash floods in the urban area of Gran Asuncion, Paraguay (Arroyo Lambare and others). Finally it is proposed to use the results measured in the field for the future design of structural and non-structural management measures required to mitigate the flow risks.

Key words : urban floods, LSPIV, Lambaré Py

Introducción

En los últimos años, la probabilidad de ocurrencia de inundaciones urbanas repentinas ha aumentado significativamente. Recientemente se han publicado diversos artículos científico-técnicos relacionados a problemáticas específicas generadas por escurrimientos superficiales durante las inundaciones urbanas repentinas donde se evaluaron los impactos de altas velocidades de flujo sobre personas y vehículos que los hacen perder su estabilidad. Cuantificar los niveles de riesgo ante esta amenaza hídrica es fundamental para mitigar los efectos.

La seguridad de personas durante una inundación repentina puede estar comprometida cuando ellas están expuestas a flujos que les dificulta permanecer en pie o cruzar una calle. La guía elaborada por el Instituto de Ingenieros de Australia (1987) [1] estipula que para prevenir que los peatones sean arrastrados en calles y otras zonas de escurrimiento durante una inundación repentina, el producto de velocidades de flujo (U) y profundidades de flujo (h) no debiera exceder el valor de $0.4 \text{ m}^2/\text{s}$.

Además se han establecido umbrales de riesgo para describir el comportamiento de vehículos en calles y carreteras durante inundaciones urbanas repentinas. Xia et al (2011) [5] presenta una fórmula para predecir la velocidad incipiente de vehículos arrastrados por el flujo sobre la base de las condiciones mecánicas de equilibrio al deslizamiento. Los parámetros que se requieren en esa fórmula fueron estimados sobre la base de datos experimentales obtenidos en laboratorio utilizando un canal y modelos de vehículos reducidos en escala.

Basado en ponencia presentada en el IV Congreso Paraguayo de RRHH-APRH 08-2015

Milanesi et al. (2015) [2] presenta un criterio de vulnerabilidad basado en la estabilidad humana ante inundaciones repentinas, donde la vida, antes que los valores económicos, podría estar amenazada. En ese trabajo se clasifica la vulnerabilidad resultante en tres niveles (bajo, medio y alto) que están limitados por dos curvas de estabilidad para niños y adultos, respectivamente.

Para evaluar el riesgo a que estarán sometidas las personas y vehículos se requieren datos de velocidad determinados en cada sector sin embargo estos datos de velocidad de flujo en sectores urbanos no están habitualmente disponibles.

Objetivos

En este trabajo se presenta una metodología experimental para la cuantificación de caudales y velocidades de flujo durante inundaciones urbanas utilizando una nueva técnica de medición disponible en la actualidad para realizar mediciones de velocidades superficiales de flujo a gran escala (LSPIV por sus siglas en ingles). Además se propone adaptar esta tecnología para su implementación con videos digitales no profesionales, generalmente realizados por vecinos durante eventos de inundación utilizando distintos dispositivos electrónicos (teléfonos celulares, cámaras digitales, etc.). El método permite, a partir de las imágenes digitales registradas en estos dispositivos, calcular los campos superficiales de velocidad del flujo, la distribución transversal de velocidades, el caudal escurrido, etc. Los resultados que se presentan en este trabajo corresponden a una inundación urbana repentina ocurrida en el área urbana del Gran Asunción, Paraguay (Arroyo Lambaré). Finalmente se propone utilizar los resultados generados con las mediciones in situ para el diseño futuro de medidas estructurales y no estructurales requeridas para mitigar el riesgo hídrico.

Materiales y métodos

A continuación se presenta el análisis realizado para caracterizar las condiciones de flujo presentes en la calle Amancio González a pocos metros de la intersección con la calle Pirizal (Ver Figura 1) durante un evento de inundación urbana repentina que provocó cuantiosos daños ocurrido el 29 de Noviembre de 2012 en el área urbana del Gran Asunción, Paraguay.



Figura 1.- Lugar de estudio en la calle Amancio González a pocos metros de la intersección con la calle Pirizal en el área urbana del Gran Asunción, Paraguay.

Durante el evento mencionado un video digital fue registrado por un vecino (una imagen del mismo que fue captada en la calle Amancio González se observa en la Figura 2); y el mismo se analiza en este trabajo.



Figura 2.- Imagen captada del video relevado por un vecino en la calle Amancio González. Con una flecha se marca la dirección del flujo.

A partir del video registrado fue posible calcular, utilizando la técnica de velocimetría LSPIV, los campos superficiales de velocidad media superficial del flujo, la distribución transversal de velocidades, el caudal escurrido, etc. Para ello se procesaron las imágenes capturadas en el video de la siguiente forma: luego de extraer las imágenes a escala de grises del video, éstas han sido procesadas con la herramienta de Matlab, PIVLab (Thielicke and Stamhuis, 2014 [4]) que permite calcular el campo de velocidad dentro de pares de imágenes. Cada campo de velocidad instantáneo ha sido procesado y se ha calculado el campo de desplazamiento medio en [pixel/par de imagen].

Resultados

A través del procesamiento digital del video, se calculó el campo de velocidad media superficial del flujo que se muestra en la Figura 3. En esta Figura se observa una apropiada determinación de los vectores de velocidad con la técnica LSPIV.



Figura 3.- Campo de velocidad media superficial obtenido al aplicar la técnica LSPIV

Utilizando distancias existentes entre puntos que se visualizan en el video y el campo de velocidad media superficial, se procedió a rectificar los resultados obtenidos con la técnica LSPIV (Patalano et al., 2013 [3]), obteniendo el siguiente resultado:

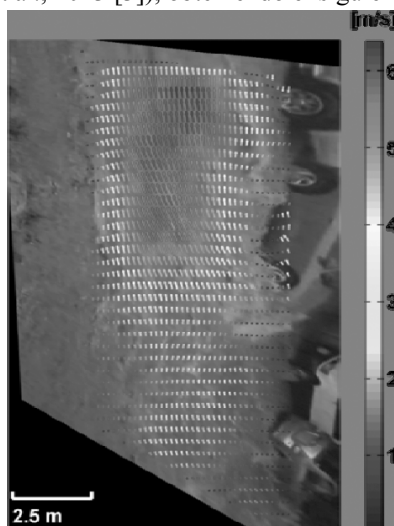


Figura 4.- Campo de velocidad media superficial rectificado.

Al analizar el campo de velocidad calculado se observa que las velocidades superficiales van desde 0 (en las márgenes) a más de 6 m/s (en la zona central del cauce luego de la contracción del flujo generada por los autos ubicados en la margen derecha). A partir de este campo de velocidad media superficial rectificado se extrajeron los siguientes perfiles de velocidad:

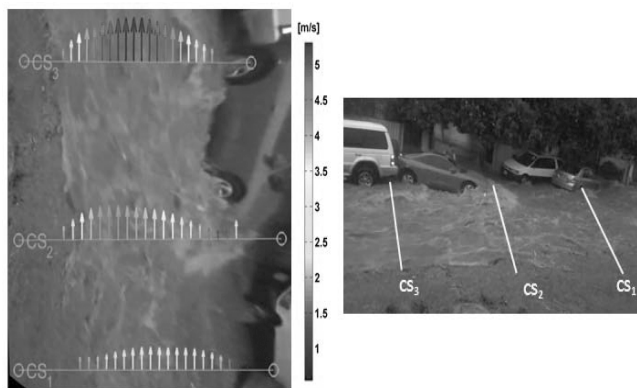


Figura 5.- Perfiles de velocidad media superficial extraídos con su correspondiente ubicación.

Al analizar esta última figura se observa que inicialmente (sección CS_1) el flujo se hallaba uniformemente distribuido en el ancho de la calle. La velocidad máxima en esta sección es de 3 m/s (y se da en el centro de la calzada) y la velocidad media es 2.3 m/s.

La segunda sección (CS_2) coincide con la ubicación del auto que provoca una contracción significativa en la margen derecha del flujo. La velocidad máxima en esta sección es de 4.2 m/s y la velocidad media es 2.9 m/s.

Finalmente, en la sección relevada más hacia aguas abajo (CS_3) se alcanzan las máximas velocidades del flujo (5.4 m/s) y la velocidad media en esta sección es 3.9 m/s.

Para poder estimar tirantes del flujo y el caudal escurrido en esta calle urbana durante el evento, es necesario conocer la sección mojada. En la actualidad esta calle se ha modificado, y la que existe hoy en día no corresponde al video; es por ello que se estimó una sección típica de las calles de Paraguay: con un ancho de calzada de 7.5 metros y veredas de 2.5 metros a ambos lados. Los linderos municipales son en su mayoría amurallados y la pendiente de la calle según las curvas de nivel es de 3.6%. La calzada del tramo en estudio se encontraba empedrada.

Para estimar el tirante de agua en la sección en primer lugar se recurrió al análisis visual del video captado: en el mismo se observa que el agua nunca llega al eje de los neumáticos (salvo en los casos donde los autos actúan como una obstrucción directa del flujo, tal es el caso del auto que se intersecta con el perfil CS_2 en la margen derecha). Para

todos los demás casos el nivel del agua coincide con el inicio de la llanta de los vehículos y los mismos se encontraban estacionados sobre la vereda de la calle. Si se tiene en cuenta que un neumático patrón de los automóviles es como el mostrado en la Figura 6 y ese neumático posee una anchura de banda de rodadura de 195 milímetros; podríamos estimar que el nivel del agua alcanzado en la vereda es de 0.2 metros.



Figura 6.- Estimación del nivel de agua en la zona de análisis.

Aplicando lo anteriormente mencionado, la sección de la calle es la que se muestra en la Figura 7:

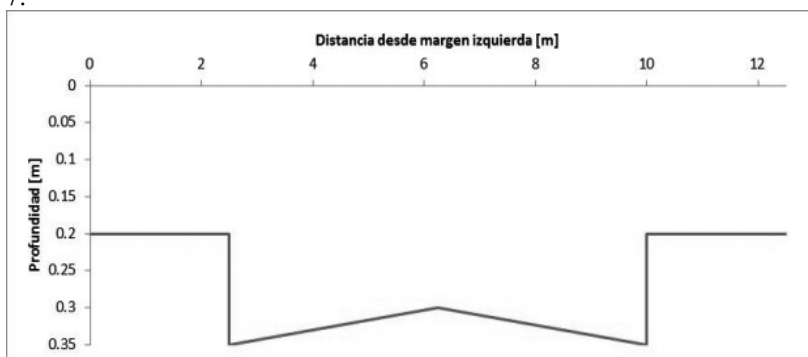


Figura 7.- Sección de la calle en la sección de estudio.

Teniendo en cuenta los límites de riesgo definidos por el Instituto de Ingenieros de Australia (1987) [1] que se basan en las velocidades (U) y las profundidades del flujo (h) se obtiene lo siguiente:

Tabla 1.- Estimación de límites de riesgo definidos por el Instituto de Ingenieros de Australia (1987).

Perfil	U [m/s] Velocidad máxima	h [m] Tirante en el lugar donde se alcanza U	$U \cdot h$ [m ² /s]
CS ₁	2.3	0.30	0.7
CS ₂	4.2	0.33	1.4
CS ₃	5.4	0.33	1.8

Teniendo en cuenta que para prevenir que los peatones sean arrastrados en calles y otras zonas de escurrimiento durante una inundación repentina, el producto de velocidades de flujo (U) y profundidades de flujo (h) no debiera exceder el valor de ($U \cdot h$) = 0.4 m²/s para el caso de niños y de 0.6 m²/s para el caso de adultos, en este caso de estudio se observa que dicho umbral siempre es superado y en el caso de las secciones CS₂ y CS₃ se supera significativamente.

Vale recalcar que durante el evento y debido a las altas velocidad de flujo se registraron movimientos de gran magnitud de vehículos y los mismos son claramente visualizados en el video analizado (Figura 12).

Partiendo del trabajo de Milanesi et al. (2015) [2], la Figura 8 muestra los umbrales al deslizamiento, derrumbe y ahogamiento en el plano velocidad (U) – tirante (h), para el caso de agua clara ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) y terreno horizontal (pendiente nula), para niños (línea gruesa) y adultos (línea fina).

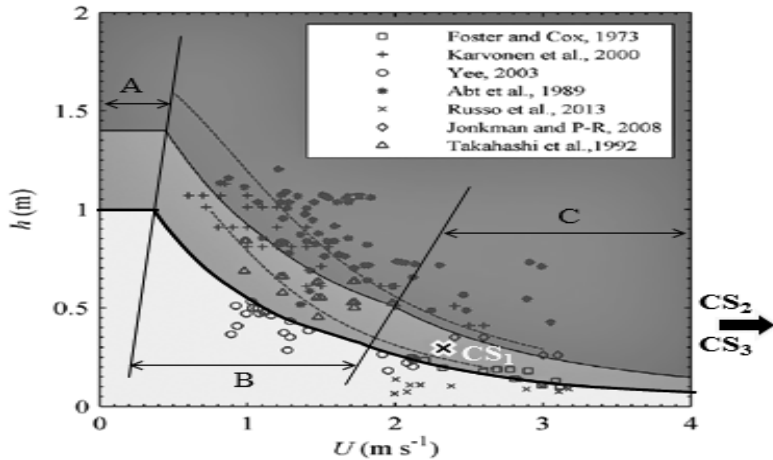


Figura 8.- Umbrales de estabilidad para los adultos (línea delgada) y niños (línea gruesa) para el caso de agua clara ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) y terreno horizontal. También se grafican los datos experimentales de la literatura y los umbrales propuestos por Xia et al. (2011) [5] (líneas discontinuas). Las áreas de alta, media y baja vulnerabilidad son, respectivamente, identificados por los colores rojo, naranja y amarillo - Milanesi et al. (2015) [2].

En la última figura se identifican los rangos de velocidad asociados a cada mecanismo de inestabilidad: el rango A es controlado por ahogamiento, el B por derrumbe y el C por deslizamiento. Las discontinuidades de la primera derivada de las curvas permiten identificar los rangos de velocidad asociados a cada mecanismo de inestabilidad. Se observa claramente que hay una influencia decreciente de la profundidad y un papel creciente de la velocidad al pasar de A a C.

Además, utilizando los umbrales que separan los niños de los adultos se definen en el gráfico 3 regiones: de baja (color amarillo), media (color naranja) y alta vulnerabilidad (color rojo).

En el mismo gráfico se superponen los puntos experimentales tomados de la literatura que fueron realizados por diferentes autores. La velocidad máxima admisible tiende a 0 cuando $h = Y$ (estatura del individuo) tanto para los umbrales de deslizamiento como de derrumbe.

Si se plotan en la Figura 8 los valores de las velocidades máximas medidos en los diferentes perfiles de este trabajo (que son los de la Tabla 1 y que se grafican en la figura anterior con cruces negras), se muestra que el punto correspondiente al perfil CS₁ queda dentro del gráfico en la zona de vulnerabilidad media y en el rango C (que corresponde a la zona donde el mecanismo de inestabilidad asociado es el de deslizamiento). Sin embargo, los valores correspondientes a CS₂ y a CS₃ quedan fuera de los límites del gráfico y corresponden a la zona de vulnerabilidad alta y en el rango C. Con esto queda

muy clara la gravedad de la inundación urbana que en este trabajo se caracteriza y se busca describir en forma detallada y completa.

Para la estimación del caudal se utilizó la sección mostrada en la Figura 7 y el perfil de velocidad media superficial CS_1 (que se muestra en la Figura 5). A partir de ambos se calculó un caudal escurrido por la calle de estudio de **$8.3 \text{ m}^3/\text{s}$** .

Para contrastar este valor aforado y complementar el estudio aquí presentado es que se realizó un modelo numérico de la hidrodinámica del flujo en el tramo de estudio. El software utilizado fue Hec-RAS; el cual es un programa de simulación hidráulica/hidrodinámica creado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineering). El modelo numérico incluido en este programa permite realizar análisis de flujo permanente unidimensional gradualmente variado a superficie libre para distintos caudales escurridos. Mediante este programa se procedió a simular hidráulicamente el flujo en el tramo de estudio.

Para la implementación del modelo es necesario definir parámetros o coeficientes de rugosidad requeridos para simular la resistencia al flujo del fondo y las márgenes. En la implementación del modelo para la cuantificación del escurrimiento superficial máximo generado durante el evento hidrometeorológico y debido a que durante los eventos de crecidas el flujo inunda las veredas, se tuvo en cuenta que la rugosidad de las veredas no es la misma que la rugosidad de la calzada debido a que ambas zonas no están formadas por el mismo material (la calzada es empedrada y las veredas poseen vegetación y obstáculos tales como autos, infraestructura, etc. que afectan el escurrimiento del flujo). Los coeficientes de rugosidad adoptados en este estudio (en este caso se utilizan coeficientes de rugosidad “n” definidos por Manning) se detallan a continuación:

- Se adoptó un valor de n de Manning de 0.030 para las veredas (valor extraído de la bibliografía para planicies de inundación formadas por pasturas)
- Para determinar el coeficiente de la calzada se implementó una metodología novedosa. Para ello en primer lugar se analizó el video digital aquí mostrado con el fin de estimar la velocidad superficial del flujo aplicando la técnica LSPIV (que son las mostradas en la Figura 4). Además, tal como se mencionó, a partir de este video se determinaron las alturas de la superficie libre de flujo alcanzadas (Figura 6). A partir de la velocidad máxima alcanzada en la sección CS_1 (que es de 3 m/s) y la altura del flujo estimadas del análisis del video digital (0.2 metros de nivel de agua sobre veredas) se calibró el valor del n de Manning. Finalmente el valor que mejor representa el caso de estudio es 0.028 (si uno toma en cuenta la bibliografía, este valor se aplica para canales abiertos excavados sin vegetación por lo que tiene lógica la aplicación de este orden de magnitud del n de Manning).

En la Figura 9 se observa el campo de velocidad transversal de flujo en la sección CS_1 luego de la implementación de los n de Manning finalmente aplicados. Se observa una

velocidad en el centro de la calzada de 3 m/s y una altura de la superficie libre en las márgenes (zona de vereda) de 0.2 metros que se corresponde con lo observado en campo.

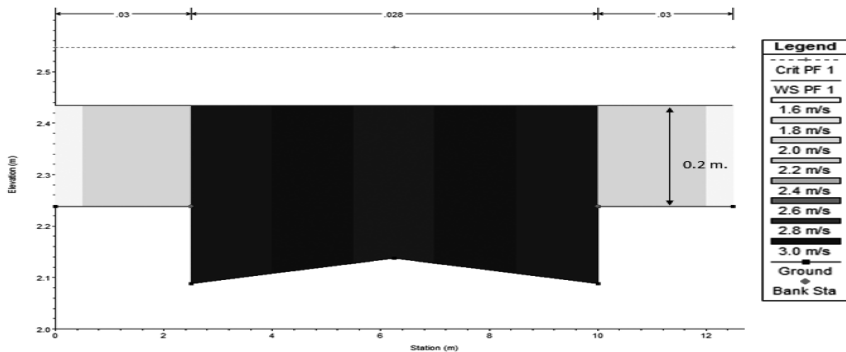


Figura 9.- Sección de control CS₁ utilizada para la calibración del n de Manning.

Luego de la calibración de los coeficientes de rugosidad de Manning de tal forma que se verifiquen las velocidades y alturas del flujo relevadas durante el evento de crecida en la sección de control CS₁ se procedió a calcular el caudal escurrido durante el evento de crecida. Al modelar la sección de estudio con los parámetros anteriormente mencionados se alcanzó un caudal escurrido de **9 m³/s** (valor muy cercano al estimado previamente a partir del perfil de velocidad y la sección relevada).

Finalmente, para complementar el estudio de los umbrales de movimiento se han extraído del video tres momentos para ser analizados con la metodología propuesta por Milanesi et al. (2015) [2].

1. En un tramo del video analizado se visualizan personas en la margen derecha del flujo, más precisamente en la vereda (Figura 10):
2. Como se observa que la zona donde están ubicadas las personas corresponde a la vereda de la calle, utilizando la sección CS₁ del modelo hidrodinámico calibrado (Figura 9) se estima que la velocidad del flujo allí vale 1.8 m/s y el tirante es 0.2 metros. Si a ese par de valores se los superpone en la Figura 8, se estaría dentro de la zona de vulnerabilidad baja (y es por ello que no hay arrastre de estas personas



Figura 10.- Tramo del video analizado donde se visualizan personas ubicadas en la vereda de margen derecha.

afectadas por la inundación) y en la región C (que corresponde a la zona donde el mecanismo de inestabilidad asociado es el de deslizamiento).

3. En otro tramo del video se visualiza que una de las personas en un intento por subirse a uno de los vehículos es arrastrada por el flujo y esto no finalizó en una tragedia debido a que un compañero logró sostenerlo a último momento (Figura 11):



Figura 11.- Tramo del video analizado donde se visualiza el arrastre de una de las personas mientras intentaba subirse a un vehículo.

En este caso la zona donde está ubicada la persona arrastrada corresponde a la unión de la vereda con la calzada; y utilizando la sección CS₁ del modelo hidrodinámico calibrado (Figura 9) se estima que la velocidad del flujo allí vale 2.9 m/s y el tirante es 0.35 metros. Si a ese par de valores se los superpone en la Figura 8, se estaría dentro de la zona de vulnerabilidad alta (y es por ello que hay arrastre de la persona) y

en la región C (que corresponde a la zona donde el mecanismo de inestabilidad asociado es el de deslizamiento).

4. También en el video analizado se visualizan autos arrastrándose en el centro de la calzada (Figura 12):



Figura 12.- Tramos del video analizado donde se visualizan autos arrastrándose en la calle
Amancio González.

En este caso como la zona donde se observan los autos arrastrados por el flujo coinciden con las secciones CS_2 y CS_3 ; las velocidades en esa ubicación superan ampliamente los 4 m/s y el tirante vale entre 0.3 y 0.35 metros. Si esos valores se superponen en la Figura 8, los mismos quedarían dentro de la zona de vulnerabilidad alta (y es por ello que hay arrastre del vehículo) y en la región C (que corresponde a la zona donde el mecanismo de inestabilidad asociado es el de deslizamiento). Vale aclarar que si bien el estudio de Milanesi et al. (2015) [2] se ha realizado para personas y no para automóviles, con este trabajo se demuestra que si se alcanzan estas velocidades ni siquiera estos elementos de gran peso se pueden mantener inmóviles ante el paso del flujo.

Conclusiones

- Se determinaron experimentalmente in situ velocidades del flujo en calles durante un evento extraordinario de inundaciones urbanas utilizando una nueva técnica de medición disponible en la actualidad para realizar mediciones de velocidades superficiales de flujo a gran escala: LSPIV. La técnica resultó satisfactoria para determinar las velocidades de flujo y caudales. Durante el evento y debido a las altas velocidad de flujo se observaron movimientos de gran magnitud de vehículos.
- Se complementan perfectamente las mediciones experimentales en campo con los modelos numéricos hidrodinámicos del flujo y en conjunto pueden alcanzarse resultados muy buenos para la caracterización espacio temporal de la mecánica de los

flujos escurridos durante eventos de crecidas. Al comparar los caudales estimados por las dos metodologías se alcanzó un valor muy cercano y del orden de los $9 \text{ m}^3/\text{s}$.

- En base a la correcta interpretación del video se pudo obtener información fundamental para la calibración del modelo hidrodinámico que simula el evento ocurrido. Para determinar los coeficientes de rugosidad seleccionados se implementó una metodología novedosa.
- Al calcular los límites de riesgo definidos por el Instituto de Ingenieros de Australia (1987) [1], que se basan en la velocidad del flujo y la profundidad del mismo, se obtiene que el producto de velocidades de flujo (U) y profundidades de flujo (h) excede siempre los 0.4 y $0.6 \text{ m}^2/\text{s}$ que es el valor límite definido para niños y adultos respectivamente para prevenir que los peatones sean arrastrados en calles y otras zonas de escurrimiento.
- Se pudieron caracterizar diferentes zonas del video analizado teniendo en cuenta el criterio de vulnerabilidad propuesto por Milanesi et al. (2015) [2]. Se demostró que si las personas permanecían en la vereda las mismas se encontraban en una zona de vulnerabilidad baja; mientras que si se encontraban en la calzada ocurría lo contrario (vulnerabilidad alta). Además, la contracción del flujo ocasionada por los vehículos en la margen derecha no hizo más que aumentar notablemente la vulnerabilidad y la peligrosidad de la situación.

Referencias

- [1] Instituto de Ingenieros de Australia (1987) Australian Rainfall and Runoff, Vol. 1&2. (Ed: Pilgrim, D.H.) Institution of Engineers, Australia.
- [2] Milanesi, L., M. Pilotti, and R. Ranzi (2015), A conceptual model of people's vulnerability to floods, Water Resour. Res., 51, 182–197, doi:10.1002/2014WR016172.
- [3] Patalano A.; Brevis, W.; Guillén, N. F.; Alvarez, J.; García, C. M.; Bleninger, T; Rodríguez A. (2013). “Rectificación digital para mediciones de velocidad de flujo a gran escala utilizando velocimetría por imágenes de partículas”
- [4] Thielicke, W., y Stamhuis, E. J. (2014). “PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB.” Journal of Open Research Software, 2
- [5] Xia, J; Fang Yenn Teo; Lin, Binliang; Falconer, R.. Nat Hazards (2011) 58:1–14. DOI 10.1007/s11069-010-9639-x.