

XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
LIMA, PERÚ, 26 AL 30 DE SEPTIEMBRE DE 2016

MODELO NUMÉRICO PARA LA SIMULACIÓN DINÁMICA DE
INUNDACIONES URBANAS EN SIG

Laurent Courty^{1,2}, Adrián Pedrozo-Acuña²

¹ Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, DF 04510 México.
lcourty@iingen.unam.mx

² Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, DF 04510 México

RESUMEN:

A nivel mundial, las inundaciones representan una de las preocupaciones más importantes del sector público. Más aún, si estas se producen en zonas densamente pobladas como grandes ciudades, donde la incidencia de estos fenómenos representa un reto significativo para su seguridad y futura sostenibilidad. Así, es necesario generar estrategias de prevención efectivas, que provean información precisa de la situación hidrológica, el uso y tipo de suelo en la cuenca, así como el funcionamiento de la red de drenaje pluvial. El presente trabajo de investigación, introduce un primer esfuerzo en este sentido, con la simulación de flujos superficiales en cuencas urbanas; con el fin último de producir un sistema de modelado integral de inundaciones para ambientes urbanos. Para ello, se introduce el desarrollo de la primera fase de *Itz'i*, un modelo numérico que tiene su base en la discretización de las ecuaciones simplificadas de aguas someras, en una plataforma compatible con Sistemas de Información Geográfica y de libre distribución. Esta capacidad simplifica el manejo de datos de entrada y salida del modelo, así como su utilización dinámica en espacio y tiempo. A manera de validación, se presenta la reproducción numérica de una inundación reportada para la ciudad de Hull, en el Reino Unido durante el mes de junio de 2007. La comparación de los resultados numéricos con datos recabados por autoridades locales después del evento, demuestran un adecuado desempeño de la herramienta numérica, lo que abre la puerta a su uso en la generación de mejores decisiones en México.

ABSTRACT:

Worldwide, urban floods are one of the most important concerns for the public sector. Moreover, when such events occur in highly populated zones like big cities, their incidence represents a significant challenge to its security and future sustainability. Therefore, it is necessary to generate effective urban flood prevention strategies, which provide precise information of the hydrologic setting, the soil type and land use within the catchment, and the performance of the drainage network. With this on mind, this work introduces a first effort on this direction by means of a numerical model that simulates superficial flows in cities, with the ultimate goal of producing an integrated modelling system of urban environments. For this, the development of a numerical tool named *Itz'i* is presented. The model is based on the discretisation of the simplified shallow water equations, in an open source GIS platform, enabling the simple use of dynamical variables (inputs/outputs) in space and time. For its validation, we introduce the numerical reproduction of a flood event in the city of Hull, United Kingdom; that occurred during the month of June 2007. The good comparison of numerical results against those observed by local authorities in a post-event survey, demonstrate the adequate performance of the numerical tool; which opens the door towards its use in the generation of best-interest decision-making in Mexico.

PALABRAS CLAVES: modelización; inundaciones; sistema de información geográfica; software libre

INTRODUCCIÓN

En el último siglo, las zonas urbanas han sobrepasado a las zonas rurales en casi todas las dimensiones del desarrollo económico, sea la tasa de innovación, el nivel educativo, salud, esperanza de vida, mortandad infantil, acceso al agua potable y servicios de sanidad. Con la alta densidad poblacional, la concentración de bienes y más del 80% de las ciudades localizadas en cuencas, las inundaciones representan un reto significativo para su sostenibilidad en el futuro.

Por otro lado, con la concentración del crecimiento económico de países en vías de desarrollo en megalópolis como la Ciudad de México, así como en ciudades medianas, se incrementa considerablemente el número de personas expuestas a inundaciones. Existen 388 ciudades en el mundo con una población mayor a un millón de habitantes y 44 de estas se encuentran en América Latina; cuatro de las megalópolis con población mayor a 10 millones de habitantes son latinoamericanas (México, Sao Paulo, Buenos Aires y Río de Janeiro), lo que representa cerca del 10% de la población regional total. En este sentido, no es sorprendente que a nivel mundial se espere un incremento en los impactos por inundación que se registran en zonas urbanas, como resultado del aumento en la frecuencia de inundaciones (Adikari and Yoshitani 2009).

La simulación numérica de inundaciones en ambientes urbanos, representa hoy día un reto significativo para las autoridades encargadas de la gestión de la infraestructura hidráulica, quienes requieren herramientas modernas que les permitan conocer el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios de operación. Esta tarea, es sumamente complicada en un clima cada vez más intenso, pues se requiere conocer además de las condiciones de lluvia, su interacción con la operación de la red de drenaje primario, de tal suerte que su capacidad de diseño no se vea superada. Es por ello que en años recientes, diversos estudios han abocado una gran cantidad de esfuerzos a la solución acoplada de flujo superficial y redes de drenaje; actividad que requiere el acoplamiento de modelos de una dimensión para la red de drenaje y dos dimensiones para el flujo superficial (Schmitt et al. 2004; Seyoum et al. 2011). En ciudades y a una escala local, estas aproximaciones producen estimaciones adecuadas para problemas de riesgo por inundación, sin embargo, su exactitud depende de un número de factores que incluyen la resolución de los datos topográficos, las condiciones de frontera, y representación adecuada de la geometría real de los colectores.

Por otro lado, es sabido que la solución de problemas de inundación urbana tiene un alto coste computacional, en virtud de que se necesita una alta resolución en la información y representación numérica de los sistemas. Con el desarrollo tecnológico y el incremento en la disponibilidad de información de alta resolución, se ha abierto una puerta para el empleo de modelos de este tipo; sin embargo, existen limitaciones asociadas a los tiempos de cálculo requeridos para resolver las ecuaciones de aguas someras, a una escala espacial tan reducida. Es por ello que con el propósito de hacer más eficientes los tiempos de cálculo de estas herramientas, son cada vez más comunes los que tienen su base matemática en la solución de la onda difusiva (Bradbrook et al. 2004; Hunter et al. 2005; Yu and Lane 2006), o en la solución simplificada de las ecuaciones de aguas someras conocidos como de inercia parcial (Bates et al. 2010; Yu and Coulthard 2015).

A pesar de estos avances, este tipo de modelos tienen el inconveniente de que para algunos casos, presentan inestabilidades numéricas producidas por los reducidos coeficientes de fricción comúnmente usados en zonas urbanas. La búsqueda de una solución a este problema, dio como resultado una ecuación de inercia parcial amortiguada por los valores en celdas vecinas y un cálculo del término de fricción en dos dimensiones (De Almeida and Bates 2013; De Almeida et al. 2012). En virtud de estos avances, y de la necesidad por contar con una herramienta versátil y abierta en países en vías de desarrollo; este artículo documenta el primer esfuerzo realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, para el desarrollo de una herramienta hidrodinámica cuasi-bidimensional para flujos superficiales en zonas urbanas. El modelo Itzi, resuelve las ecuaciones de inercia parcial amortiguada, está escrito en lenguaje *Python* y es compatible con plataformas de Sistemas de Información Geográfica de libre distribución (e.g. GRASS) (Neteler et al. 2012).

Con el propósito de comprobar la utilidad de este modelo, se presenta la reproducción numérica de la inundación de junio de 2007, en la ciudad de Hull, Reino Unido. Haciendo evidente

su utilidad para incorporar el mejor conocimiento disponible en el mundo, en la generación de mejores estrategias de reducción de riesgo debido a estos eventos.

PRESENTACION DEL MODELO

Resolución numérica

El modelo presentado resuelve las ecuaciones de aguas someras de forma simplificada, a través del método de diferencias finitas (De Almeida and Bates 2013; De Almeida et al. 2012). El cálculo de flujo está compuesto por ecuaciones cuasi-bidimensionales, que resuelven de manera independiente el flujo en cada dimensión. La Figura 1, presenta un diagrama con las variables incluidas en la solución numérica implementada.

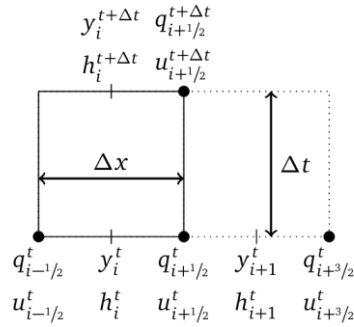


Figura 1.- Variables usadas para la resolución numérica en la dimensión x . El mismo principio se aplica para la dimensión y .

Cada paso de tiempo se calcula el intervalo de tiempo (Δt) por medio de la ecuación [1], en donde h_{max} es la profundidad máxima de agua en todo el dominio, g la aceleración de la gravedad y α un coeficiente necesario para cumplir con la condición de Courant – Friedrichs – Lewy. Su valor es por defecto igual a 0.7 (De Almeida and Bates 2013).

$$\Delta t = \alpha \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{\sqrt{g \times h_{max}}} \quad [1]$$

El flujo ($L^2 \cdot T^{-1}$) se calcula por medio de la ecuación explícita ilustrada en [2], donde n es el coeficiente de fricción de Manning, S la pendiente hidráulica y θ un coeficiente que permite el peso relativo de los flujos arriba y debajo del punto considerado. h_f es la profundidad del flujo, calculada como la diferencia entre el nivel máximo de agua y la altitud máxima entre la dos celdas.

$$q_{i+1/2}^{t+\Delta t} = \frac{\left(\theta \cdot q_{i+1/2}^t + (1 - \theta) \frac{q_{i-1/2}^t + q_{i+3/2}^t}{2} \right) + gh_f \Delta t S}{1 + g \Delta t m^2 \left\| q_{i+1/2}^t \right\| / h_f^{7/3}} \quad [2]$$

La estimación del valor resultante de flujo, producto de las componentes en cada dirección cartesiana $\left\| q_{i+1/2}^t \right\|$, se estima de acuerdo a la ecuación [3]. Dado que se utiliza una malla no-centrada (cf. Figura 1), el flujo en la dimensión y no está calculado en el mismo lugar que el flujo en dimensión x ; de esta manera, el valor resultante se calcula por medio del valor promedio de los cuatro valores de flujo más cercanos, en lo que se denomina una plantilla (*stencil* en inglés) de cuatro puntos.

$$\left\| q_{i+1/2}^t \right\| = \sqrt{q_{x,i+1/2,j}^t + q_{y,i+1/2,j}^t} \quad [3]$$

En aquellas celdas en las que la profundidad del agua está por debajo de un valor umbral, se utiliza para la determinación del flujo la regla propuesta por (Sampson et al. 2013), quienes proponen la utilización de una velocidad fija definida por el usuario. En este caso, el valor umbral para la profundidad del agua es de 5mm y la velocidad de $0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Por otro lado, la ecuación para el balance de masa [4] permite el cálculo de la profundidad de agua en cada celda, donde h_{ext} representa los valores exteriores como lluvia o infiltración y Q los flujos en $\text{L}^3\cdot\text{T}^{-1}$.

$$h^{t+\Delta t} = h^t + h_{ext}^t + \frac{\sum Q_{i,j}^t}{\Delta x \Delta y} \times \Delta t \quad [4]$$

Implementación

El programa está escrito en lenguaje de programación *Python* y se presenta como un módulo del Sistema de Información Geográfica (SIG) de libre distribución conocido como GRASS (Neteler et al. 2012). Para ello, se utilizó la denominada *PyGRASS* (Zambelli et al. 2013) para acceder a las funcionalidades espaciales del SIG, y *TGRASS* (Gebbert and Pebesma 2014) para utilizar esquemas que permiten el uso de datos dinámicos en tiempo. Con el propósito de hacer más eficiente la solución numérica de las ecuaciones, se utilizó una versión compilada de *Python*, conocida como *Cython* (Behnel et al. 2011), que permite además la utilización de las capacidades de los procesadores modernos utilizando núcleos múltiples.

De esta manera, las características más destacables de *Itzi* son las siguientes:

- La integración dentro de un SIG, simplificando los pasos de preparación de los datos de entradas y el análisis de los datos de salida,
- La utilización de variables dinámicas en espacio y tiempo (i.e. series de mapas tipo *ráster*) como datos de entrada, lo que permite por ejemplo, el empleo de eventos de lluvia espacialmente distribuida en el dominio y coeficientes de fricción que cambian en el tiempo,
- La posibilidad de usar referencias de tiempo absoluto, de tipo fecha y hora, para definir el inicio y el final de la simulación. Eso facilita el uso de mediciones reales y el proceso de verificación de los resultados a partir de evento real, sin cambiar los datos de entrada.
- La libre distribución del código fuente bajo una licencia que autoriza el uso y la modificación del software por parte de otros miembros de la comunidad científica y el público en general.

CASO DE ESTUDIO

Con el propósito de verificar los resultados y la implementación de nuestra herramienta numérica, se utiliza un evento de inundación real ocurrido en la ciudad de Hull, Reino Unido durante el 25 de junio de 2007. La localización de la zona de estudio está representada en las Figura 2 y 3. La información correspondiente a este caso fue proporcionada por el Dr. Dapeng Yu de la Universidad de Loughborough, Inglaterra, y se encuentra publicada en (Yu and Coulthard 2015). La precipitación utilizada corresponde a mediciones realizadas por la Universidad de Hull. Por lo que, el forzamiento climático utilizado corresponde al hietograma de la tormenta que se presenta en la Figura 4. En este caso, se utiliza una distribución espacialmente uniforme para la lluvia con una resolución temporal de una hora.

Por otro lado, el modelo digital de terreno (MDT) que se utiliza, posee una resolución espacial de cinco metros y fue obtenido por medio de datos de altimetría láser conocido como LiDAR. La Figura 5 presenta el dominio numérico utilizado con el MDT, el cual representa un área de 87.7 km^2 , con resolución espacial de 5m, lo que resulta en un dominio numérico rectangular compuesto por 3.5 millones de celdas.

Adicionalmente, la Figura 6 presenta aquellas zonas dentro del dominio numérico que fueron reportadas como afectadas durante este evento de inundación. Estas zonas, registradas por la Agencia

del Medio Ambiente de Reino Unido (*Environmental Agency*) y por Ayuntamiento de la ciudad de Hull se reportan en la figura por medio de los polígonos rojos y azules, respectivamente. En este caso, y siguiendo las recomendaciones de Yu and Coulthard (2015), se incorpora de forma artificial la capacidad del drenaje de la ciudad, por medio de la implementación de una pérdida uniforme y constante de 55mm/día. Por otra parte el coeficiente de fricción se define con un valor constante para todo el dominio con valor de 0.03 (Yu and Coulthard 2015).

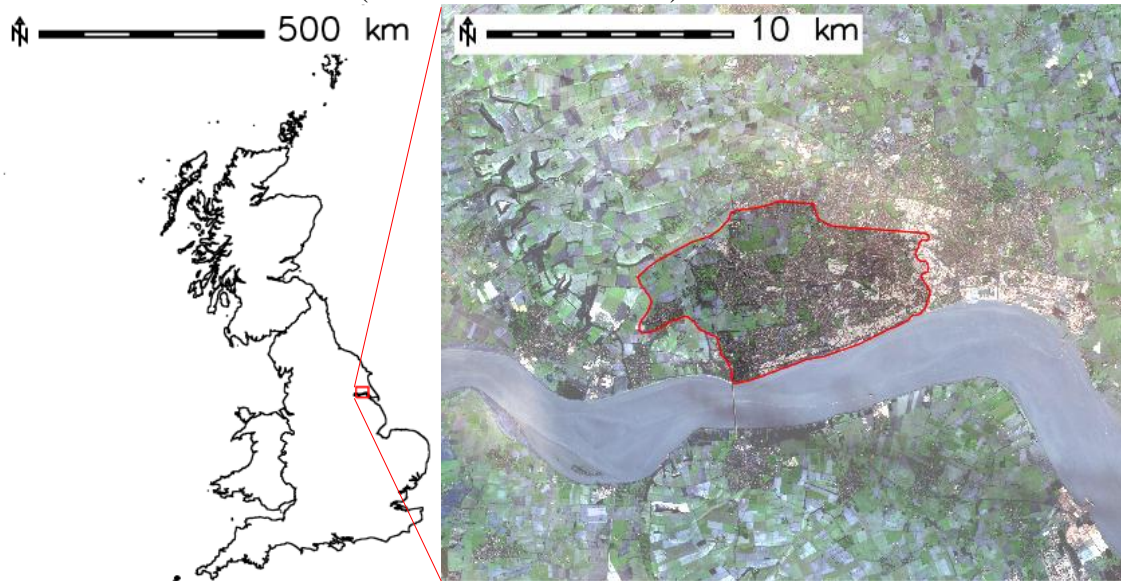


Figura 2.-Localización de la zona de estudio en Gran Bretaña (Imagen Copernicus Sentinel 2016)

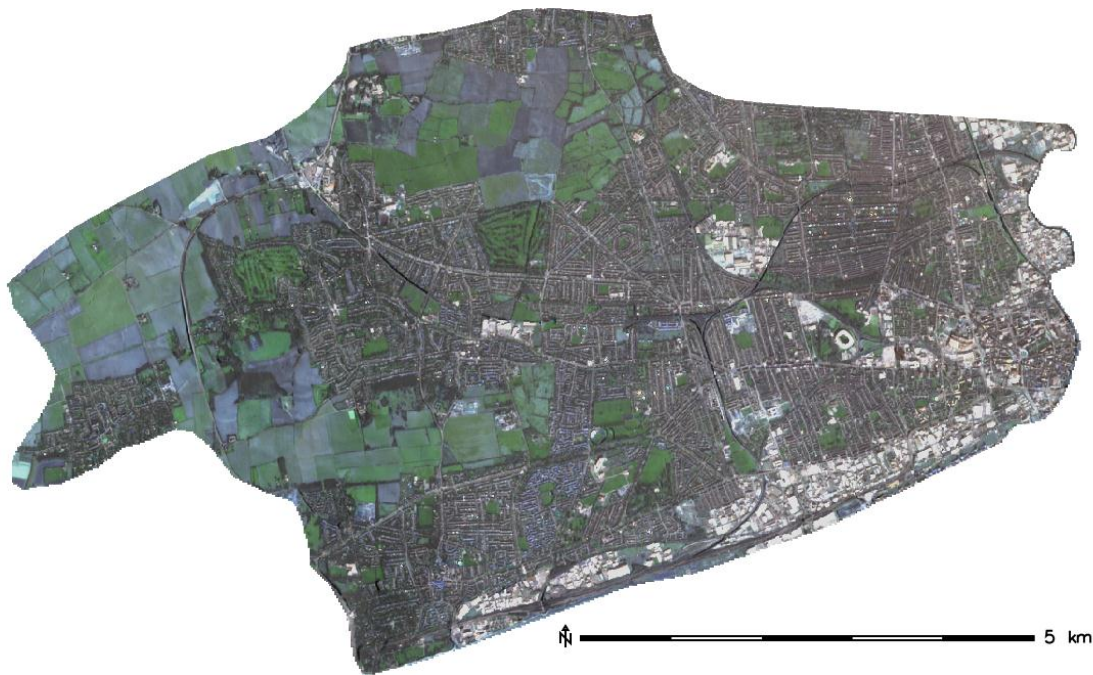


Figura 3.- Imagen de la zona de estudio por el satélite Sentinel 2a (Datos Copernicus Sentinel 2016)

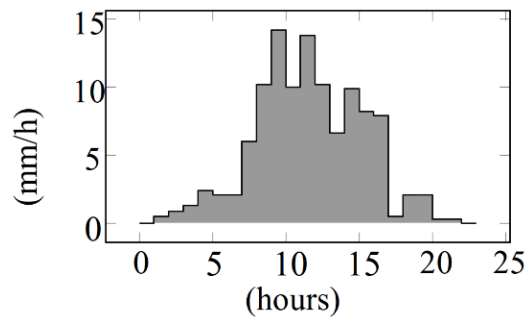


Figura 4.- Hietograma medido en la universidad de Hull

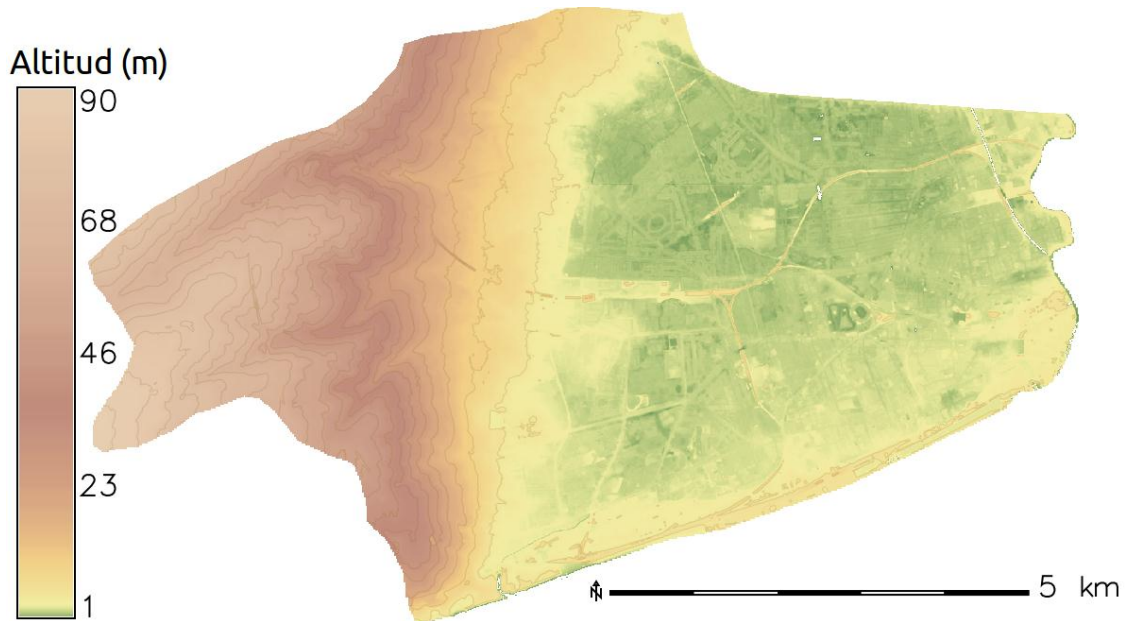


Figura 5.- Modelo de terreno de la ciudad de Hull

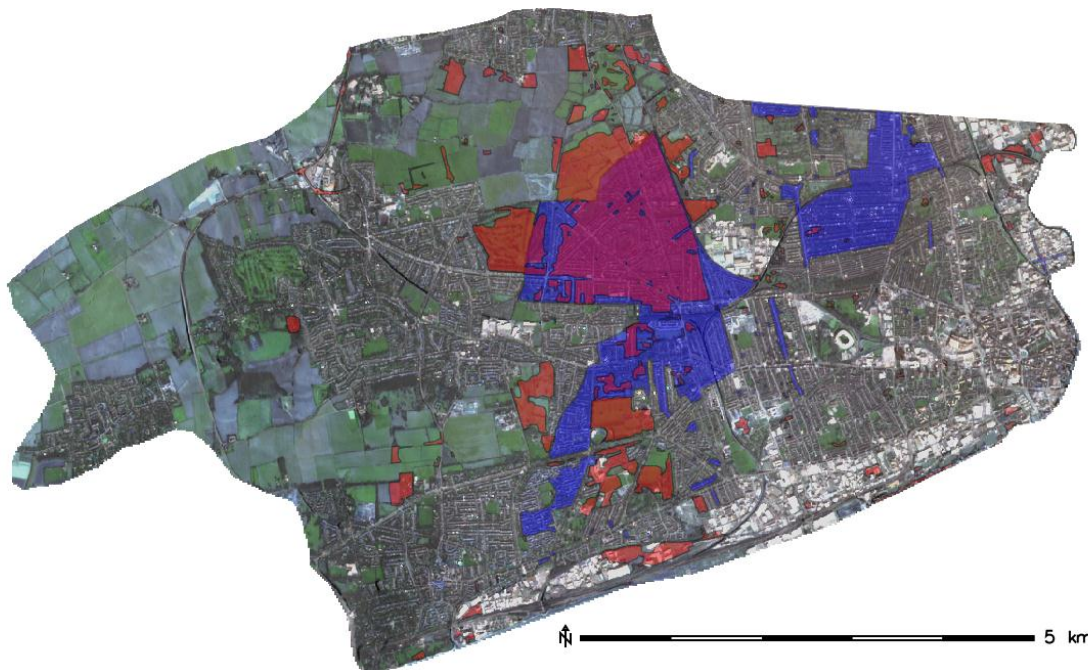


Figura 6.- Zonas inundadas. Azul: medición del ayuntamiento de Hull. Rojo: medición de la agencia del medio ambiente (Imagen de satélite por Copernicus Sentinel 2016)

Resultados

Esta sección introduce los resultados numéricos correspondientes al evento en cuestión. En primer término, con el propósito de revisar la eficiencia del modelo con diferentes procesadores en la computadora personal, la Tabla 1 reporta los diferentes tiempos de cómputo que se necesitaron para dos diferentes computadoras con procesadores distintos. Tal y como se reportan en la tabla, es evidente que la incorporación de un procesador de escritorio con 8 núcleos, reduce considerablemente los tiempos de cómputo del modelo desarrollado, haciéndolo más eficiente.

Tabla 1.- Tiempo de computación por el evento completo de 24 horas

Plataforma	Tiempo de computación (hh:mm:ss)
Intel® Core™ i5-5200U (4 núcleos lógicos)	08:10:15
Intel® Core™ i7-4790 (8 núcleos lógicos)	03:04:55

Por otro lado, los resultados correspondientes al mapa de inundación resultante de la incidencia de este evento fueron contrastados con las mediciones de la EA y del Ayuntamiento de Hull para lo que se emplearon calificaciones de modelos dicotómicos (celdas mojadas y secas) (Stanski et al. 1989). De esta manera, se comparan a nivel de celda la condición presente de la celda, es decir si esta está mojada o seca. En el caso de los resultados numéricos, los mapas de inundación en el dominio tienen una profundidad en todas las celdas (ver ej. Figura 7.f**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, que presenta el nivel máximo alcanzado), siendo imposible determinar una diferencia en su condición mojada/seca. Para establecer esta diferencia, se introduce un nivel umbral de profundidad de inundación a partir del que se considera a la celda inundada, para este caso, la profundidad umbral seleccionada es de 20 cm.

La Figura 7 presenta la variación de la zona afectada por la inundación a lo largo del tiempo, en la que se presentan en los paneles a, b, c, d y e los instantes de simulación correspondientes a los tiempos $t=8, 12, 14, 18$ y 24 horas, respectivamente. De forma complementaria, el panel f de la misma figura presenta el mapa de los niveles máximos que alcanzó el agua en cada celda del dominio a lo largo de la simulación. Estos resultados permiten la comparación de los resultados numéricos obtenidos con los polígonos de inundación identificados por la Agencia del Medio Ambiente y el Ayuntamiento de la Ciudad de Hull, en el Reino Unido.

Con el propósito de incorporar una medida que registre de manera cuantitativa, el desempeño del modelo numérico respecto a las observaciones de campo, las Tablas 2 y 3 presentan valores de precisión y probabilidad de detección para los resultados numéricos definidos con dos diferentes salidas del modelo: los niveles de inundación al terminar la simulación (Tabla 2) y los niveles máximos de inundación (Tabla 3), en ambos casos se registran su comparación con las áreas afectadas por la inundación registradas por el Ayuntamiento de Hull y la Agencia del Medio Ambiente. Tal y como se registra en estas tablas, el parámetro de probabilidad de detección indica un mejor desempeño de los niveles máximos estimados por el modelo, mientras que el estado final de la simulación, representa mejores valores de precisión en la comparación de los resultados numéricos contra ambos conjuntos de datos de campo. En ambos casos, se presenta un buen desempeño de la herramienta numérica con una precisión superior al 0.8.

Estos resultados reportan la sensibilidad que tiene la evaluación del desempeño del modelo, respecto a la calidad de la información empleada como referencia a la realidad. En este caso, existen diferencias claras entre las zonas afectadas que se identificaron con cada conjunto de datos (Agencia del Medio Ambiente y Ayuntamiento de Hull), lo que a su vez tiene un efecto evidente en la estimación de los parámetros de desempeño.

No obstante, cabe resaltar que a pesar de las limitaciones en la discretización numérica del caso de estudio, por ejemplo, con la distribución uniforme de la lluvia en el dominio, la consideración de un coeficiente de fricción uniforme, la simplificación extrema en la representación del drenaje y la ausencia de infiltración, el modelo Itzi permitió una adecuada identificación de las zonas inundadas

que se identificaron durante las dos campañas de campo independientes utilizadas para su validación. De manera notable, el modelo reprodujo la zona afectada que fue identificada por ambas fuentes de información.

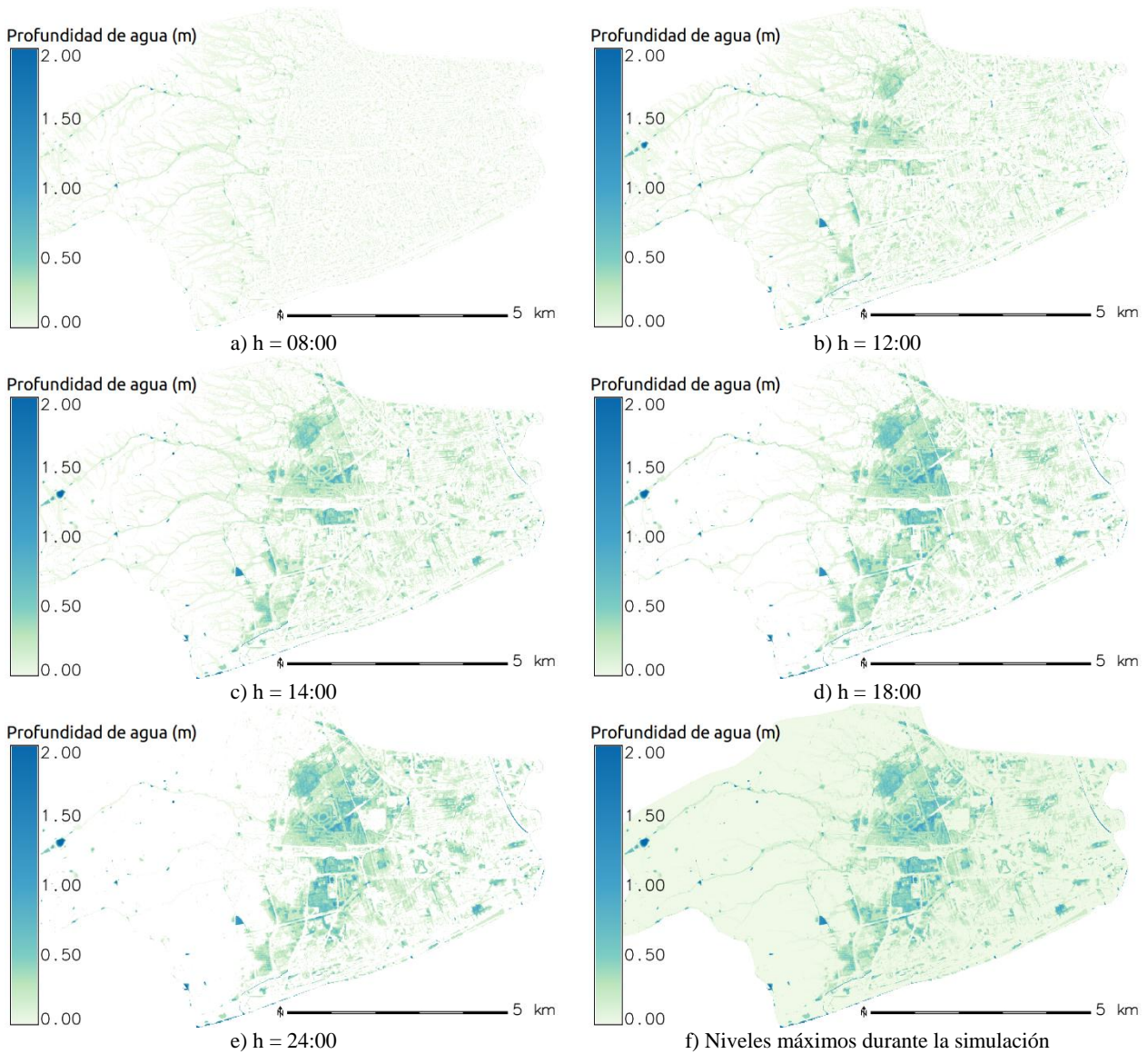


Figura 7.- Profundidades de agua simuladas

Tabla 2.- Verificación de la mancha de inundación con los niveles máximos

	Fuente de verificación		
	Ayuntamiento de Hull	EA	Ambos
Precisión (<i>Accuracy</i>)	0.842	0.856	0.840
Probabilidad de detección	0.556	0.645	0.533

Tabla 3.- Verificación de la mancha de inundación con los niveles al final de la simulación

	Fuente de verificación		
	Ayuntamiento de Hull	EA	Ambos
Precisión (<i>Accuracy</i>)	0.856	0.875	0.850
Probabilidad de detección	0.495	0.594	0.479

CONCLUSIÓN

Este artículo presentó el desarrollo de la herramienta de modelización hidrodinámica Itzi, la cual representa el acoplamiento de los procesos hidrológicos asociados a la relación lluvia-escorrentamiento con un modelo de inercial para el flujo superficial. De manera notable, el modelo numérico está integrado en una plataforma SIG de código libre y distribución gratuita, que permite el uso dinámico de variables en espacio y tiempo, tales como la precipitación o el coeficiente de fricción de Manning. Esta característica es nueva en este tipo de herramientas, y sus virtudes están por ser demostradas en casos de estudio donde se tenga la calidad y tipo de información necesaria para su validación.

El desempeño del modelo fue documentado por medio de la reproducción numérica de un evento de inundación ocurrido en junio de 2007 en la Ciudad de Kingston upon Hull, Reino Unido. Y su buen desempeño permitió la verificación de las capacidades de la herramienta numérica desarrollada para la simulación eficiente de este tipo de eventos (considerando algunas hipótesis). Los resultados presentados anticipan una gran utilidad de este tipo de herramientas, para la generación de información que puede resultar fundamental en el mejoramiento de la toma de decisiones ante eventos de inundación en México.

El trabajo futuro estará abocado a acoplar este modelo con un modelo de drenaje unidimensional, que permitirá la solución paralela de la red primaria de drenaje y los flujos superficiales en ambientes urbanos.

Agradecimientos

Los datos de entrada del caso de estudio correspondiente a la Ciudad de Hull fueron gentilmente proporcionados por el Dr. Dapeng Yu de la Universidad de Loughborough, Reino Unido.

Laurent Courty extiende un agradecimiento a la Coordinación de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México, por la beca doctoral otorgada para la realización de sus estudios.

Referencias Bibliográficas

- Adikari, Y., and Yoshitani, J. (2009). *Global Trends in Water-Related Disasters: an insight for policymakers*. International Centre for Water Hazard and Risk Management (ICHARM).
- De Almeida, G. a M., and Bates, P. (2013). "Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modeling." *Water Resources Research*, 49(8), 4833–4844.
- De Almeida, G. a M., Bates, P., Freer, J. E., and Souvignet, M. (2012). "Improving the stability of a simple formulation of the shallow water equations for 2-D flood modeling." *Water Resources Research*, 48(5), 1–14.
- Bates, P. D., Horritt, M. S., and Fewtrell, T. J. (2010). "A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling." *Journal of Hydrology*, Elsevier, 387(1), 33–45.
- Behnel, S., Bradshaw, R., Citro, C., Dalcin, L., Seljebotn, D. S., and Smith, K. (2011). "Cython: The Best of Both Worlds." *Computing in Science Engineering*, 13(2), 31–39.
- Bradbrook, K. F., Lane, S. N., Waller, S. G., and Bates, P. D. (2004). "Two dimensional diffusion wave modelling of flood inundation using a simplified channel representation." *International Journal of River Basin Management*, 2(3), 211–223.
- Gebbert, S., and Pebesma, E. (2014). "TGRASS: A temporal GIS for field based environmental modeling." *Environmental Modelling & Software*, Elsevier, 53, 1–12.
- Hunter, N. M., Horritt, M. S., Bates, P. D., Wilson, M. D., and Werner, M. G. F. (2005). "An adaptive time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation." *Advances in Water Resources*, 28(9), 975–991.
- Neteler, M., Bowman, M. H., Landa, M., and Metz, M. (2012). "GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS." *Environmental Modelling & Software*, Elsevier, 31, 124–130.
- Sampson, C. C., Bates, P. D., Neal, J. C., and Horritt, M. S. (2013). "An automated routing

methodology to enable direct rainfall in high resolution shallow water models.” *Hydrological Processes*, 27(3), 467–476.

Schmitt, T. G., Thomas, M., and Ettrich, N. (2004). “Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems.” *Journal of Hydrology*, 299(3-4), 300–311.

Seyoum, S. D., Vojinovic, Z., Price, R. K., and Weesakul, S. (2011). “Coupled 1D and noninertia 2D flood inundation model for simulation of urban flooding.” *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, 138(1), 23–34.

Stanski, H. R., Wilson, L. J., and Burrows, W. R. (1989). *Survey of common verification methods in meteorology*. World Meteorological Organization Geneva.

Yu, D., and Coulthard, T. J. (2015). “Evaluating the importance of catchment hydrological parameters for urban surface water flood modelling using a simple hydro-inundation model.” *Journal of Hydrology*, 524, 385–400.

Yu, D., and Lane, S. N. (2006). “Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 1: mesh resolution effects.” *Hydrologic Processes*, 20(7), 1541–1565.

Zambelli, P., Gebbert, S., and Ciolli, M. (2013). “Pygrass: An object oriented python application programming interface (API) for geographic resources analysis support system (GRASS) geographic information system (GIS).” *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2(1), 201–219.