

# Calibración de un Modelo Basado en Agentes para el estudio del peligro de inundación en el río Santa Bárbara

Orellana Daniel<sup>1,2</sup>, Timbe Luis<sup>2</sup>, Pinos Juan<sup>2</sup>

1 Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Cuenca  
Av. 12 de Octubre, Cuenca / Azuay / Ecuador  
daniel.orellana@ucuenca.edu.ec

2 Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca  
Av. 12 de Abril, Cuenca / Azuay / Ecuador  
luis.timbe@ucuenca.edu.ec, juan.pinosf@ucuenca.edu.ec

## RESUMEN

Las inundaciones por desborde de ríos representan uno de los riesgos naturales más importantes en las ciudades andinas. Una gestión efectiva del riesgo de inundación requiere información espacio-temporal sobre las zonas afectadas y la profundidad del agua para eventos de crecida en diferentes períodos de recurrencia. El objetivo de este artículo es comparar los resultados de un modelo conceptual de inundaciones basado en agentes (ABM) con los de un modelo hidráulico (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System HEC-RAS) para el estudio de riesgos de inundación en el Río Santa Bárbara (Gualaceo, Provincia del Azuay, Ecuador). La metodología empleada consiste en los siguientes pasos: A. Conceptualización del comportamiento del agua con respecto a la topografía, B. Implementación del modelo conceptual utilizando un modelo basado en agentes, C. Aplicación del modelo en un caso piloto, y finalmente D. Calibración de resultados con un modelo hidráulico bi-dimensional. Los resultados indican que los mapas de superficie inundada obtenidos por el modelo ABM son comparables a los del modelo hidráulico HEC-RAS. En cuanto a la profundidad del agua, el modelo ABM produce valores similares a los de HEC-RAS para la zona central del área de estudio mientras que las zonas altas y bajas presentan diferencias importantes. Por otro lado, el modelo ABM automatizado permite cuantificar fácilmente la probabilidad de inundación. Los ABM constituyen una alternativa viable a los modelos hidráulicos bi-dimensionales para estudiar cómo los errores altitudinales de los modelos digitales de elevaciones se propagan hacia los mapas de peligro de inundación. A su vez estos modelos constituyen herramientas clave para representar y comunicar la incertidumbre asociada a dichos modelos.

Palabras clave: **Modelos basados en agentes, simulación de inundaciones, gestión de riesgos, modelos digitales de elevaciones.**

## ABSTRACT

*Floods due to overflowing rivers represent one of the most important natural hazards in Andean cities. Effective flood risk management requires spatio-temporal information on affected areas and water depth for flood events at different recurrence periods. The aim of this paper is to compare the results of a conceptual agent-based model with a two-dimensional hydraulic model (HEC-RAS) for the study of flood risks in the Santa Bárbara River*

(Gualaceo, Azuay Province, Ecuador). The methodology consists of the following steps: A. Conceptualization of water behavior related to topography. B. Implementation of the agent-based model. C. Pilot application for the case of the Santa Barbara River. D. Model calibration using a two-dimensional hydraulic model. The results indicate that the flooded surface maps obtained by the ABM model are comparable to those of the HEC-RAS hydraulic model. As for water depth, the ABM model produces values similar to those of HEC-RAS for the central section of the study area, while the high and low zones present important differences. On the other hand, the automated ABM model allows to easily quantify the probability of flooding. ABM is a viable alternative to two-dimensional hydraulic models to study how altitudinal errors on digital elevation models propagate to flood hazard maps. In turn, these models are key tools for representing and communicating the uncertainty associated with these models.

**Keywords:** Agent Based Models, Flood simulation, Risk management, Digital Elevation Models.

## I. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones fluviales representan uno de los riesgos naturales más importantes en las ciudades andinas debido a su frecuencia y altos impactos económicos. A pesar de los esfuerzos cada vez mayores de los organismos de planificación y gestión, los daños por inundaciones siguen en aumento en todo el mundo (Milly, Wetherald, Dunne, & Delworth, 2002). Una gestión efectiva del riesgo de inundación requiere información espacio-temporal sobre los eventos de crecida de los ríos, las zonas aluviales potencialmente afectadas y la profundidad del agua para eventos de crecida con diferentes períodos de recurrencia. Esta información es generalmente presentada en “mapas de inundación”.

Frente a la carencia parcial o total de información histórica de áreas inundadas, es posible analizar el peligro de inundación a través de modelos hidráulicos. Estos modelos implican al menos tres componentes: estimación de caudales de crecida (mediante modelización hidrológica o análisis de valores extremos de caudales observados), modelización hidráulica para estimar la profundidad del agua, y análisis de elevaciones del terreno para estimar las áreas de inundación (Whiteaker, Robayo, Maidment, & Obenour, 2006). Comúnmente, el resultado de estos modelos de inundación consiste en un mapa determinístico que representa el área inundada y la profundidad del agua para un flujo de caudal determinado. Por ejemplo, en la zona de influencia del río Burgay se ha utilizado un modelo hidráulico unidimensional para estimar las zonas inundables (Timbe & Timbe, 2012). Sin embargo, los valores estimados del caudal y de las elevaciones del terreno no están exentos de errores e incertidumbres, las cuales se propagan a través de los modelos afectando el resultado final (Merwade, Olivera, Arabi, & Edleman, 2008). Como consecuencia, los mapas determinísticos de inundación no suelen incluir información relacionada a los errores asociados a los datos de entrada y menos aún al grado de incertidumbre del resultado final. Esto puede tener implicaciones complejas en la toma de decisiones de planificación, prevención y respuesta a los riesgos de inundaciones.

Entre las diferentes fuentes de incertidumbre en los modelos de inundaciones, la topografía es una de las variables que más influye en la precisión de los resultados finales (Cook & Merwade, 2009; Saksena & Merwade, 2015). La topografía es usualmente representada en un modelo digital de elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés). Wechsler (2007) reporta varios aspectos de los DEMs que pueden afectar los modelos hidráulicos, entre ellos: los errores de medición, la escala impuesta, los métodos de interpolación utilizados, y los algoritmos de procesamiento empleados para generar DEMs hidrológicamente viables. Es imprescindible, por lo tanto, estudiar y cuantificar los efectos que tienen los errores altitudinales en los modelos de inundaciones y valorar la incertidumbre de los mapas producidos.

El estudio de la propagación de errores puede ser implementado utilizando diferentes enfoques, entre los cuales están aquellos basados en simulaciones de Monte Carlo. Este tipo de enfoques se basan en realizar cientos o miles de repeticiones de un modelo variando uno o más parámetros de entrada y analizar las características estadísticas de los resultados de salida. De esta manera, conociendo la distribución de probabilidad de la incertidumbre de las variables de entrada, es posible conocer la distribución de probabilidad del resultado.

En la práctica, el principal inconveniente de la utilización de simulaciones de Monte Carlo para el estudio de propagación de errores en los modelos hidráulicos de crecidas es la limitada capacidad de automatización de los paquetes informáticos utilizados, dificultando así el análisis y la cuantificación de la incertidumbre de los resultados del modelo. Por ejemplo, HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), uno de los paquetes informáticos más utilizados para simulación de inundaciones, permite automatizar el componente unidimensional, pero no tiene capacidades de automatización para los DEMs de entrada del componente bidimensional (Brunner, 2016).

Una posible solución frente esta limitación es implementar un modelo de inundaciones conceptual utilizando un enfoque de Modelos Basados en Agentes (ABM, por sus siglas en inglés). Los ABMs son una familia de modelos de sistemas complejos en los cuales los elementos del mundo real se modelan como agentes individuales relativamente autónomos, cada uno con un comportamiento potencialmente heterogéneo e independiente, que es capaz de interactuar con otros agentes y con su entorno. Dos características clave de los ABMs los hacen interesantes para la modelación de inundaciones. Por un lado, la relación espacial entre los agentes es modelada de forma explícita, pues el entorno de los agentes (llamado “mundo” en los lenguajes ABM) es definido con sus fronteras y propiedades. Por otro lado, las características globales del sistema no se modelan directamente (top-down), sino que aparecen como resultado de las interacciones individuales, como un fenómeno emergente (bottom-up) (Holland, 2000). Los ABM facilitan, por lo tanto, el estudio de sistemas complejos a partir de las unidades que los componen, permitiendo explorar escenarios experimentales de la realidad desde lo más simple hacia lo más complejo (Izquierdo, Galán, Santos, & Del Olmo, 2008).

Los modelos de crecidas basados en agentes constituyen una prometedora aproximación al estudio de inundaciones, ya que permiten gran flexibilidad y excelentes posibilidades de automatización. Sin embargo, se conoce poco si los resultados de la simulación de inundaciones con ABMs son comparables a aquellos producidos por los modelos hidráulicos clásicos (basados en las propiedades físicas) aplicados en cuencas andinas.

El objetivo de éste artículo, por lo tanto, es comparar el mapa de inundaciones resultante de un modelo conceptual basado

en agentes con el mapa producido por un modelo hidráulico bidimensional (HEC-RAS) para el estudio de la gestión de riesgo de inundación en el Río Santa Bárbara (Gualaceo, Provincia del Azuay, Ecuador) tomando en cuenta solamente la topografía. Adicionalmente, busca demostrar la viabilidad de los ABMs para generar mapas que permitan cuantificar y comunicar la incertidumbre de los resultados producidos por los errores en dichos modelos.

Las restantes secciones de este artículo se estructuran como sigue: La sección II presenta detalles sobre la implementación de un modelo conceptual de inundaciones basado en agentes y su aplicación para analizar el riesgo de inundaciones en la ciudad de Gualaceo, Ecuador. La sección III presenta mapas de inundación del modelo conceptual y los compara con mapas obtenidos a través de un modelo hidráulico implementado en HEC-RAS. Finalmente, la sección IV expone las principales conclusiones de los autores sobre la viabilidad del uso de ABM para la modelación de inundaciones por desborde de ríos.

## II. METODOLOGÍA

La metodología empleada en el presente estudio comprende de las siguientes fases: A) Conceptualización del comportamiento del agua, B) Implementación del modelo conceptual utilizando un modelo basado en agentes, C) Aplicación del modelo en un caso piloto, y finalmente D) Calibración de resultados con un modelo hidráulico bi-dimensional.

### A. MODELO CONCEPTUAL DE COMPORTAMIENTO DEL AGUA

El comportamiento del agua durante un evento de inundación es un fenómeno altamente complejo, pues está influenciado por factores como el caudal de ingreso, la topografía y la rugosidad del terreno. Todos estos factores suelen ser considerados en las ecuaciones de flujo de los modelos hidráulicos. Para ésta investigación se ha optado por el principio de parsimonia con el fin de producir un modelo lo suficientemente sencillo como para poder ser implementado con un método basado en agentes que sea automatizable, pero que a su vez represente adecuadamente las interacciones entre el agua y la topografía. Aunque la intención del presente artículo no es presentar el modelo basado en agentes (el cual se detalla en otra publicación en elaboración), en los siguientes párrafos se presenta una breve descripción del mismo.

El modelo conceptual se basa en la analogía de la bañera: El comportamiento del agua en el terreno es modelado como un conjunto de bañeras comunicadas por tuberías y localizadas en cada celda del DEM. El flujo desde una celda se modelada a partir de la diferencia entre la altura absoluta del agua en una celda y cada una de las celdas vecinas. Si la altura del agua en la celda central es mayor, el agua fluye hacia las celdas vecinas; si es menor, el agua fluye de las celdas vecinas hacia la celda central; si la altura es igual, el flujo es cero (Figura 1).

### B. IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO BASADO EN AGENTES

La implementación de ésta analogía en un modelo basado en agentes es relativamente directa. Se modelan dos tipos de agentes: "celda" y "agua"; los agentes "celda" representan las localizaciones con sus respectivos valores de elevación del terreno ( $th$ ), mientras que los agentes "agua" representan las bañeras. Con el fin de optimizar el modelo, los agentes "agua" se crean progresivamente según fluye el agua dentro del modelo. El lugar por donde el agua entra al "mundo" es modelado asignando a una o varias celdas la propiedad "origen". Durante la ejecución del modelo, cada agente "agua" escanea su entorno y compara la altura absoluta de agua con la de

sus celdas vecinas. Si la altura es mayor, se crea un agente "agua" en la celda correspondiente y se determina la cantidad de agua a fluir en función de la diferencia de altura. Este proceso se repite en cada paso del tiempo. Cuando el agua llega al "borde del mundo" fluye hacia fuera y se elimina del modelo. El "origen y borde del mundo" equivale a las condiciones de contorno de un modelo hidráulico tradicional.

Este comportamiento relativamente sencillo a nivel individual da lugar a un comportamiento complejo a nivel global, y permite recrear diversos escenarios tales como el desborde de un río o las inundaciones por lluvia. Es importante notar que el modelo no incluye otros factores que afectan el comportamiento del agua, tales como la velocidad de flujo la infiltración o los coeficientes de fricción de Manning.

El modelo se implementó en lenguaje NetLogo 6.0 utilizando como base un modelo desarrollado por Ligtenberg y de Bruin en el Laboratory of Geo-information Science and Remote Sensing de Wageningen University (Países Bajos). Los detalles del modelo, así como el código completo serán publicados como material adicional de un artículo de próxima publicación dedicado al tema.

La implementación del modelo permite parametrizar todas las variables de un evento de inundación. Entre ellas, las más importantes para simular un evento de caudal pico son: Flujo base, que representa el caudal en  $m^3/s$  del río en condiciones normales y que es utilizado para estabilizar el modelo como condición inicial antes del evento de inundación. Tiempo de estabilización, es el tiempo necesario para estabilizar el modelo, y representa el tiempo en minutos del mundo real que tarda el agua en recorrer el cauce del río desde el inicio hasta el fin de la zona de estudio. Flujo pico, es el caudal máximo que se alcanza durante un evento de crecida. Tiempo pico, es el tiempo en minutos del mundo real en el que se alcanza el flujo pico. Tiempo Final, es el tiempo que dura la simulación en minutos del mundo real. Este conjunto de parámetros forma el "hidrograma" del evento de inundación. Por lo tanto, cada simulación está definida por su correspondiente hidrograma de caudal.

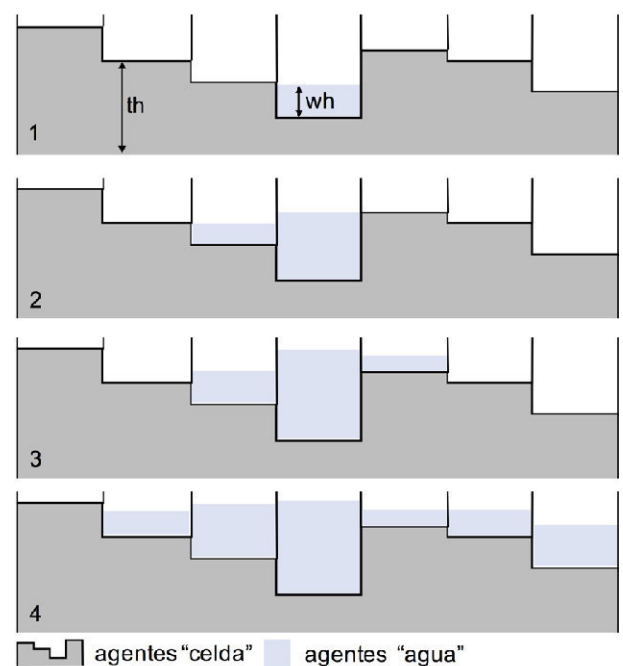


Figura 1. Modelo conceptual de la bañera para representar la interacción del flujo de agua con la topografía. DOI: 10.6084/m9.figshare.5047057.

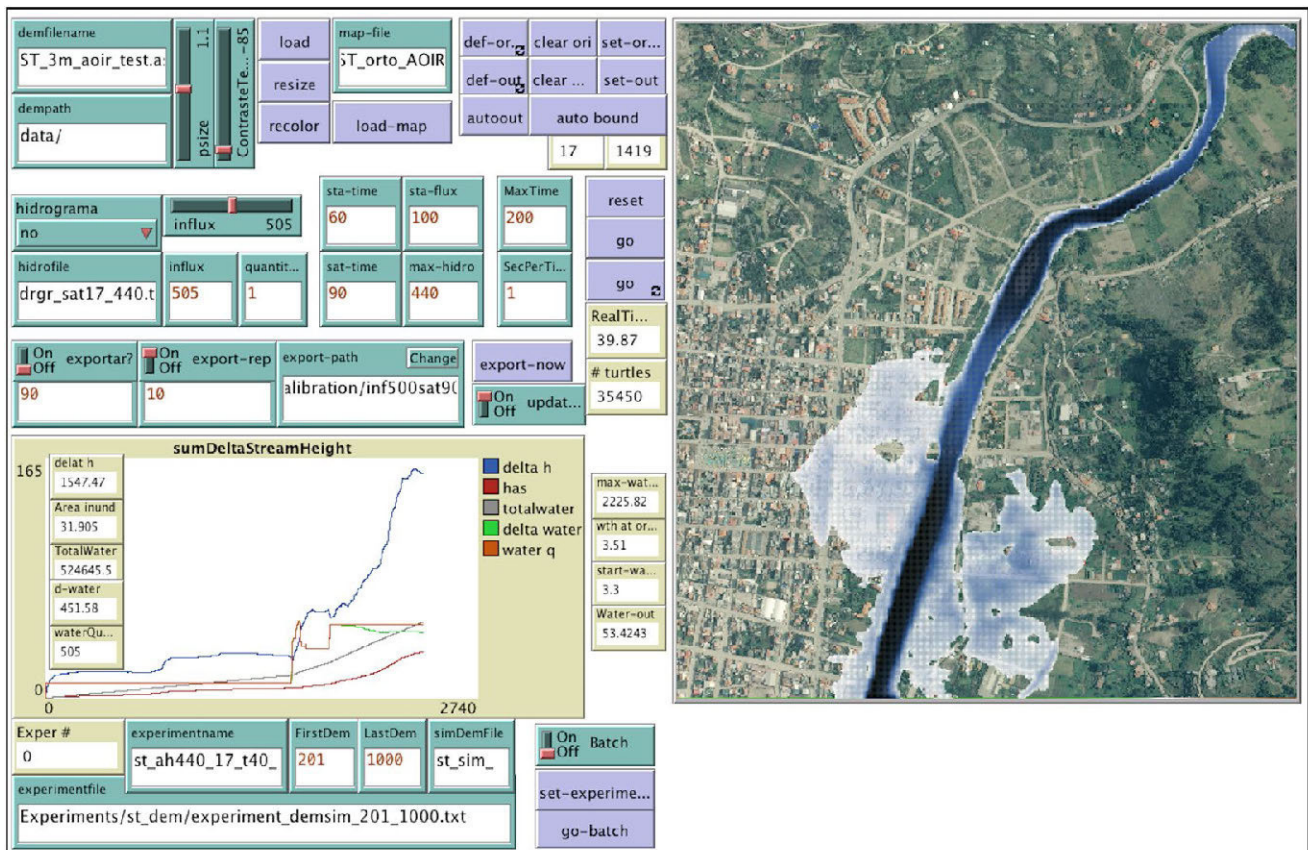


Figura 2: Interfaz de usuario del modelo implementado en NetLogo 6.0. DOI: 10.6084/m9.figshare.5047057.

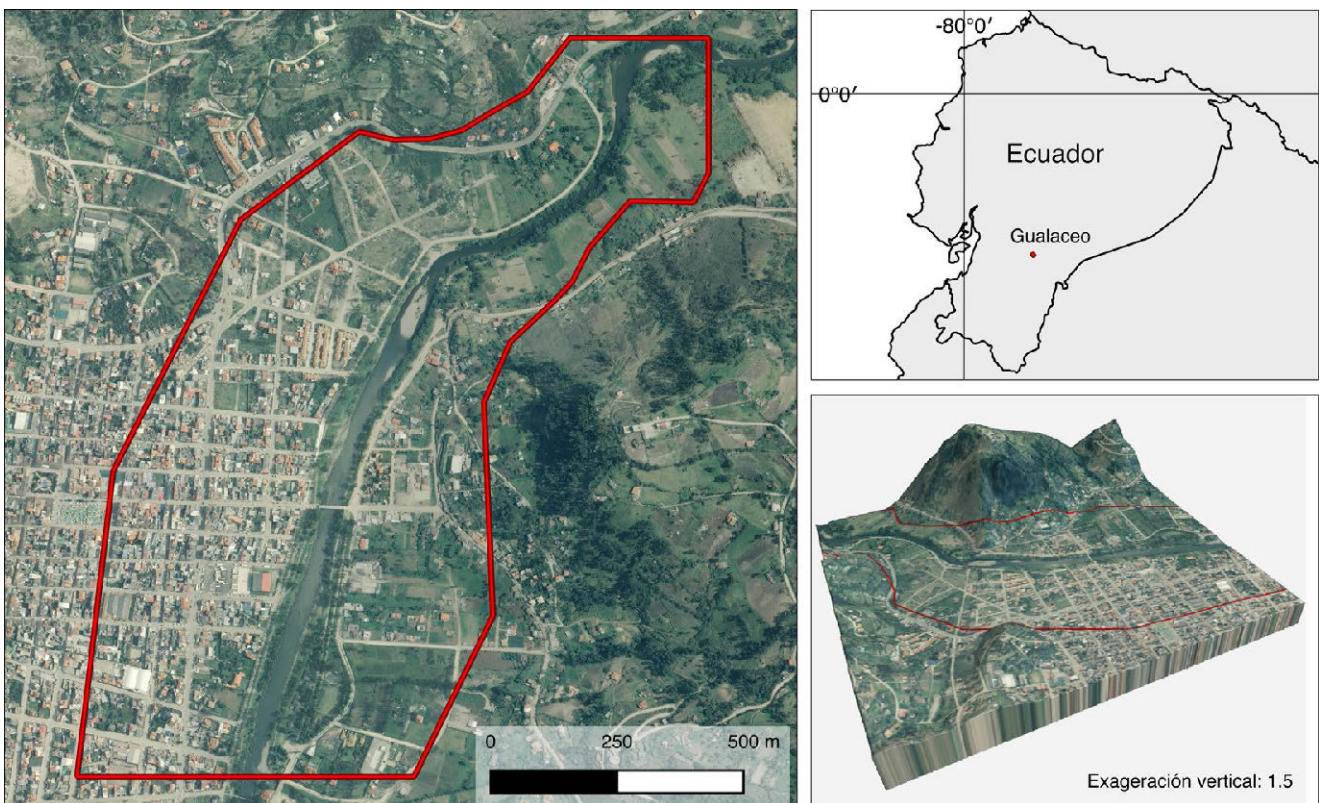


Figura 3. El área de estudio está constituida por la zona de influencia del río Santa Bárbara a su paso por la ciudad de Gualaceo (Azuay, Ecuador). El recuadro inferior derecho es una representación tridimensional de la zona)

Adicionalmente, se definen las condiciones de borde, es decir el comportamiento del agua al ingresar y al salir del modelo. Estas condiciones incluyen: Origen, es el conjunto de celdas que definen el lugar por donde el agua entra al modelo, es decir la parte más alta del cauce del río. Salida, es el conjunto de celdas que definen los sitios por los que el agua puede salir del modelo. La figura 2 muestra la interfaz del modelo implementado.

### C. APLICACIÓN PILOTO

El modelo implementado fue puesto a prueba para estudiar el comportamiento del agua en un evento de inundación del río Santa Bárbara. El área de estudio comprende la zona de influencia del río Santa Bárbara en la zona norte de la ciudad de Gualaceo (Azuay, Ecuador), ubicada en un valle interandino con un rango altitudinal entre los 2200 y 2500 m s.n.m. La zona oeste del río está ocupada principalmente por el área urbana de Gualaceo y la zona este presenta un mosaico de parcelas agrícolas y construcciones dispersas (Figura 3).

Los datos utilizados incluyen un Modelo Digital de Elevaciones con una resolución espacial de 3m proveniente del proyecto SIGTIERRAS (MAGAP, 2012) y datos de caudal obtenidos por SENAGUA (2014).

### D. CALIBRACIÓN CON UN MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL

Con la finalidad de explorar la viabilidad del ABM implementado para producir mapas de inundación, el modelo fue comparado con una simulación equivalente implementada en el modelo hidráulico bidimensional HEC-RAS. Este es uno de los modelos más utilizados en estudios de inundaciones y ampliamente aceptado por investigadores y técnicos, por lo que seleccionado como modelo de referencia.

El proceso de calibración inició ejecutando una primera vez el ABM con el mismo hidrograma de la simulación de referencia en HEC-RAS. A continuación, se repitió secuencialmente la simulación ABM usando diferentes combinaciones de valores para los parámetros de entrada del hidrograma Tiempo de Estabilización, Flujo Pico, Tiempo Pico y Tiempo Final, y explorando el mapa de inundación resultante hasta obtener valores similares al mapa de referencia.

Los parámetros de evaluación incluyeron: límites del área inundada, superficie total inundada y profundidad de inundación. Adicionalmente se calculó el valor medio cuadrático (RMS, por sus siglas en inglés) de las diferencias entre los valores de profundidad de inundación de los resultados del ABM y los valores correspondientes del modelo HEC-RAS. Esto permitió obtener un único valor estadístico (función objetivo) que puede ser utilizado para evaluar de forma general el ajuste del modelo. Si los resultados de los dos modelos son muy diferentes, el RMS tiende a ser mayor, y viceversa. Un RMS = 0 implica que los resultados de las dos simulaciones son iguales.

Debido a que el número de combinaciones posibles de valores de los parámetros de entrada puede llegar a ser demasiado grande para ser implementado en la práctica, se realizó un análisis exploratorio preliminar para reducir estos valores a unos rangos mínimos y máximos fuera de los cuales los resultados serían demasiado diferentes a la simulación de referencia.

Todos los cálculos estadísticos se realizaron en lenguaje R (R Core Team, 2016) y los resultados fueron representados geográficamente en el sistema de información geográfica QGIS 2.18 (QGIS Developing Team, 2016).

## III. RESULTADOS

Al ejecutar cada simulación, el modelo inicia ingresando 100 m<sup>3</sup>/s de agua en el Origen y permitiendo que circule por el cauce del río durante el Tiempo de Estabilización. Una vez que el cauce se ha estabilizado (el agua ha alcanzado el borde final del área de estudio), la cantidad de agua en el Origen aumenta de forma progresiva hasta alcanzar el Flujo Pico en el Tiempo Pico. A partir de entonces, el modelo genera un mapa de inundación cada 10 minutos hasta alcanzar el Tiempo Final.

El análisis exploratorio preliminar produjo los rangos de valores de los parámetros de entrada reportados en la Tabla I. El Modelo Basado en Agentes fue programado para realizar simulaciones explorando este rango de datos.

El modelo produjo un conjunto de 178 simulaciones de inundaciones potencialmente comparables a la del modelo HEC-RAS para un evento con un período de recurrencia de 50 años con un caudal máximo de 880 m<sup>3</sup>/s. La media de RMS de los mapas resultantes fue de 0.5224m con una desviación estándar de 0.15m (mín = 0.2835m, máx = 1.21m). La Figura 4 presenta la frecuencia de los valores de RMS para todas las simulaciones.

La simulación que presentó un mejor ajuste estuvo definida por un caudal de estabilización de 100m<sup>3</sup>/s, durante un tiempo de estabilización de 40 min, un flujo pico de 480 m<sup>3</sup>/s alcanzado a los 100 minutos y un tiempo final de simulación de 130 minutos. La Figura 5 muestra el mapa de inundación producido con el modelo basado en agentes luego de la calibración, así como el mapa de inundaciones producido con el modelo hidráulico HEC-RAS y la diferencia entre ambos.

La superficie total inundada de la simulación del ABM fue 41.1ha, mientras que la del modelo HEC-RAS fue de 49.8ha. Las diferencias entre las profundidades simuladas por el ABM con respecto a las de HEC-RAS se encuentran en un rango entre -1.3m y 2.1m. (media=-0.126, SD=0.326). Es importante notar que las diferencias mayores se dan en los bordes del modelo, mientras que en la zona central las diferencias son cercanas a cero.

**TABLA I**  
PARÁMETROS Y VALORES PARA LAS SIMULACIONES ABM

PARÁMETRO	MIN.	MÁX.	INTERVALO
Tiempo de Estabilización	30	90	10
Flujo Pico	380	880	20
Tiempo Pico	60	120	10
Tiempo Final	90	150	10

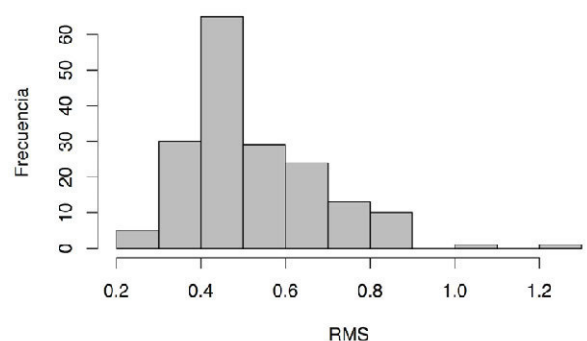


Figura 4. Frecuencia de los valores de RMS de las diferencias en metros entre las simulaciones y los resultados del Modelo Basado en Agentes y el modelo de referencia.



Figura 5. Izquierda: Mapa de inundaciones producido con el ABM calibrado. Centro: Mapa de inundaciones producido con el modelo hidráulico HEC-RAS. Derecha: Diferencia de las profundidades de inundación entre los dos modelos.

#### IV. CONCLUSIONES

En este artículo hemos presentado el proceso de calibración de un modelo basado en agentes (ABM) para la simulación de inundaciones por desborde de ríos comparándolo con un modelo hidráulico de referencia. Los resultados de una prueba piloto de calibración en el río Santa Bárbara (Gualaceo, Ecuador) indican que la simulación de inundaciones basada en el ABM es capaz de reproducir de manera general el resultado de la simulación de un modelo hidráulico de referencia implementado en HEC-RAS. Sin embargo, existen diferencias importantes entre ambas simulaciones, principalmente en los extremos geográficos del modelo, pues cerca del origen, el ABM tiende a subestimar la profundidad del agua, mientras que cerca de la salida, tiende a sobre-estimar. Este efecto podría deberse a que, a diferencia del modelo hidráulico basado en métodos numéricos de ecuaciones diferenciales, el ABM implementado es un modelo conceptual que no incorpora la fricción de los diferentes tipos de cobertura del suelo, haciendo que el agua fluya a una mayor velocidad, causando acumulación en las zonas de salida. Sin embargo, estas variables pueden ser incorporadas en el modelo y está planificado implementarlo en futuras versiones del mismo. La zona central del área de estudio es la que presenta las menores diferencias (aproximadamente  $\pm 0.1$  m) lo cual implica que en la práctica se podría ampliar el área de modelización más allá del área de estudio, logrando así que la zona central del modelo que presenta mayor estabilidad coincida con el área de interés. Esta recomendación, también es válida en los modelos hidráulicos:

tener una distancia adecuada al inicio y fin del tramo, de tal forma que la zona de interés no sea afectada por las condiciones de contorno.

A pesar de carecer de las características físicas de un modelo hidráulico bidimensional, la modelización de inundaciones basada en agentes representa una alternativa útil para la delimitación del área inundada y cuando no se requiera gran precisión de los resultados hidráulicos (p.e. profundidad, velocidad flujo, etc). Los ABM permiten implementar modelos conceptuales de comportamiento del agua con respecto a la topografía de manera directa y sencilla, logrando reproducir de manera relativamente adecuada los fenómenos de inundación por desborde de ríos. Además, la gran flexibilidad y posibilidades de automatización de los lenguajes ABM abren grandes posibilidades para estos modelos, por ejemplo, para realizar análisis de sensibilidad e incertidumbre. Es posible, por ejemplo, utilizar estos modelos para estudiar el efecto que tienen los errores de los datos de entrada (caudal y topografía) en los mapas de inundación utilizando métodos de Monte Carlo. Bajo la misma lógica, es posible utilizar los modelos ABM para producir mapas que no se limiten a reportar de forma binaria el riesgo de inundación (inundado/ no inundado), sino de forma probabilística (probabilidad de ser inundado), lo cual permite ampliar la comprensión sobre el riesgo y evaluar de forma más adecuada las prácticas de prevención y mitigación. El estudio de la propagación de errores y la creación de mapas de probabilidad de riesgo constituyen precisamente los próximos pasos de nuestra investigación.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestro agradecimiento a la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca a través del proyecto "Evaluación del riesgo de inundación en el Río Santa Bárbara". También agradecemos a la SENAGUA – Demarcación Hidrográfica del Santiago y al Municipio de Gualaceo por su valioso aporte con información de la zona de estudio. Finalmente agradecemos a Arend Ligtenberg y Sytze de Bruin del Laboratory for Geo-information and Remote Sensing de Wageningen University (Países Bajos), por el código base en NetLogo con el cual se desarrolló el modelo.

### REFERENCIAS

- Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual. Retrieved from <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS 5.0 2D Modeling Users Manual.pdf>
- Cook, A., & Merwade, V. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 377(1), 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.015>
- Holland, J. H. (John H. (2000). *Emergence : from chaos to order*. Oxford University Press.
- Izquierdo, L. R., Galán, J. M., Santos, J. I., & Del Olmo, R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*, (16), 85. <https://doi.org/10.5944/empiria.16.2008.1391>
- MAGAP. (2012). SIGTIERRAS.
- Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M., & Edleman, S. (2008). Uncertainty in Flood Inundation Mapping: Current Issues and Future Directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(7), 608-620. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:7\(608\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:7(608))
- Milly, P., Wetherald, R., Dunne, K., & Delworth, T. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*. Retrieved from <http://www.nature.com/nature/journal/v415/n6871/abs/415514a.html>
- QGIS Developing Team. (2016). QGIS. Open Source Geospatial Foundation. Retrieved from <http://qgis.osgeo.org>
- R Core Team. (2016). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria. Retrieved from <http://www.r-project.org/>
- Saksena, S., & Merwade, V. (2015). Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 530, 180-194. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.069>
- SENAGUA. (2014). *Análisis de la vulnerabilidad a eventos de crecida y diseño de obras físicas para la protección de márgenes e infraestructura del río Santa Bárbara, Tomo 2: Estudio hidráulico, Demarcación Hidrográfica del Santiago*.
- Timbe, L. M., & Timbe, E. P. (2012). Mapeo del peligro de inundación en ríos de montaña , caso de estudio del río Burgay. *Maskana*, 3(1), 87-96.
- Wechsler, S. P. (2007). Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(4), 1481-1500. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1481-2007>
- Whiteaker, T. L., Robayo, O., Maidment, D. R., & Obenour, D. (2006). From a NEXRAD Rainfall Map to a Flood Inundation Map. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(1), 37. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:1\(37\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:1(37))