

## SIMULACIÓN DE LAHARES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PLATANAR Y SUS POSIBLES IMPACTOS EN CIUDAD QUESADA (VOLCÁN PLATANAR, COSTA RICA)

**Sebastián Granados-Bolaños<sup>1</sup>**

Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica  
sebastian.granados@ucr.ac.cr

**Guillermo E. Alvarado<sup>2</sup>**

Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), San José, Costa Rica  
galvarado@cne.go.cr; [galvaradoi@ice.go.cr](mailto:galvaradoi@ice.go.cr)

### RESUMEN

Se aplicó el modelo hidráulico Flo-2D a varios eventos de lahares (simulando diferentes volúmenes) disparados desde la cuenca alta del río Platanar, que nace cerca del cráter del volcán homónimo, los cuales eventualmente podrían afectar a ciudad Quesada. Los resultados fueron sobrepuestos con información oficial de población e infraestructura y mapeos en el campo, estimándose la cantidad de población e infraestructura que podría verse afectada para cada evento modelado. La cantidad de personas afectadas variaría en función de las características del lahar, estando entre un centenar a varios miles de personas, en un área mínima de 9 hectáreas hasta un centenar de hectáreas, donde se impactarían entre una decena hasta varios centenares de casas. Aunque la probabilidad de reactivación del volcán Platanar no se vislumbra a corto plazo, sí podrían llegarse a disparar lahares por terremotos o lluvias torrenciales. Esta información se considera fundamental para futuros desarrollos urbanos e industriales y para una adecuada gestión del riesgo, en particular por corresponder con una de las ciudades más grande del norte del país, corazón de la economía de San Carlos y con una población de unos 50 000 habitantes.

**Palabras clave:** lahar, modelamiento hidráulico, gestión del riesgo, ciudad Quesada.

### ABSTRACT

The Flo-2-D hydraulic model was applied to several events of lahars (different volumes) triggered from the upper catchment of the Platanar river, originating near the crater of the homonymous volcano, which could eventually affect ciudad Quesada. The number of people affected would vary depending on the characteristics of the lahar, ranging from a hundred to several thousand people affected, in a minimum area of 9 hectares to a hundred hectares, where between a dozen and several hundred houses would be impacted. Although the probability of reactivation of the Platanar volcano is not foreseen in the short term, lahars could be triggered by earthquakes or heavy rain. This information is considered essential for future urban and industrial developments and for proper risk management, particularly since it correspond one of the largest cities in the north of the country, heart of the economy of San Carlos, and with a population of about 50,000 inhabitants today.

**Keywords:** lahar, hydraulic modeling, risk management, Quesada city.

### INTRODUCCIÓN

Los lahares en esencia son un flujo de fragmentos volcánicos y agua que desciende desde un volcán, ya sea como un flujo de escombros volcánico denso (*debris Flow*) o un flujo diluido o hiperconcentrado (*volcanic hyperconcentrate flow*). Los lahares pueden llegar a ser altamente destructivos por su alta densidad y velocidad, su

<sup>1</sup> Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica y Observatorio del Agua y Cambio Global, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

<sup>2</sup> Unidad de Investigación y Análisis del Riesgo, Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), San José, Costa Rica.

capacidad abrasiva y la fuerza de impacto en las estructuras y formas del relieve (Janda et al., 1981). Estos flujos son una latente y constante amenaza para los poblados que se encuentran en las laderas y piedemontes de los volcanes, especialmente aquellas poblaciones localizadas sobre abanicos aluviales activos, por lo que han desencadenado numerosos desastres a nivel mundial (Okunishi et al., 2001).

En Costa Rica, los lahares han sido disparados por diversos mecanismos como erupciones volcánicas, precipitación intensa, terremotos y deslizamientos (Alvarado y Schmincke, 1994; Alvarado, 2010; Alvarado et al., 2017) y constituye la segunda causa de muertes por vulcanismo (Aguilar y Alvarado, 2014). Por ello, la zonificación de amenaza de lahares debe ser incorporada en los instrumentos de planificación del territorio y gestión del riesgo de peligros geológicos e hidrometeorológicos, dado que gran parte de la población costarricense vive sobre formaciones volcánicas cuaternarias y algunas de las ciudades densamente pobladas se encuentran sobre abanicos aluviales en los piedemontes volcánicos (p. ej., Quesada, Aguas Zarcas, Cartago, Turrialba, Guápiles, entre otras), por lo que es esencial contar con datos cuantitativos y actualizados de alta resolución, para la toma de decisiones en los abanicos aluviales urbanizados y aquellos en los planes de desarrollo, que requieren especial atención en la zonificación de inundaciones y flujos de detritos.

Diversas técnicas de modelamiento hidráulico bidimensional permiten obtener datos estadísticamente significativos acerca del comportamiento de lahares en términos de su extensión, espesor y velocidad (Zegers et al., 2020). Los modelos hidráulicos bidimensionales son una metodología ampliamente aceptada a nivel mundial para zonificar y analizar flujos de detritos y estos modelos han sido incorporados como insumos para la planificación y ordenamiento del territorio (Papanicolaou et al., 2015; Scotti et al., 2020).

En la presente investigación se presentan los resultados de una serie de simulaciones hidráulicas bidimensionales en la cuenca alta del río Platanar y sus posibles impactos aguas abajo en la ciudad de Quesada, San Carlos. Dicha ciudad se encuentra en el piedemonte del volcán Platanar, donde los índices morfométricos y las simulaciones hidráulicas parecen apuntar a una

cuenca inestable y con potencial para generar un lahar, aunque históricamente nunca se ha presentado un evento catastrófico.

Se pretendió hacer una aproximación al comportamiento de lahares en el río Platanar, para lo cual se definieron los siguientes objetivos:

- Caracterizar morfométricamente la cuenca con índices cuantitativos de relieve en Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- Calibrar y simular 4 eventos de lahar originados en la cuenca alta del río Platanar utilizando modelamiento hidráulico bidimensional.
- Estimar posibles impactos en la población e infraestructura de ciudad Quesada mediante la sobreposición del modelo hidráulico e información oficial y recolectada en campo.

A continuación, se discuten los resultados de las simulaciones, los alcances y limitaciones del modelamiento hidráulico bidimensional en ciudad Quesada.

## BREVE MARCO GEOLÓGICO Y GEOGRÁFICO

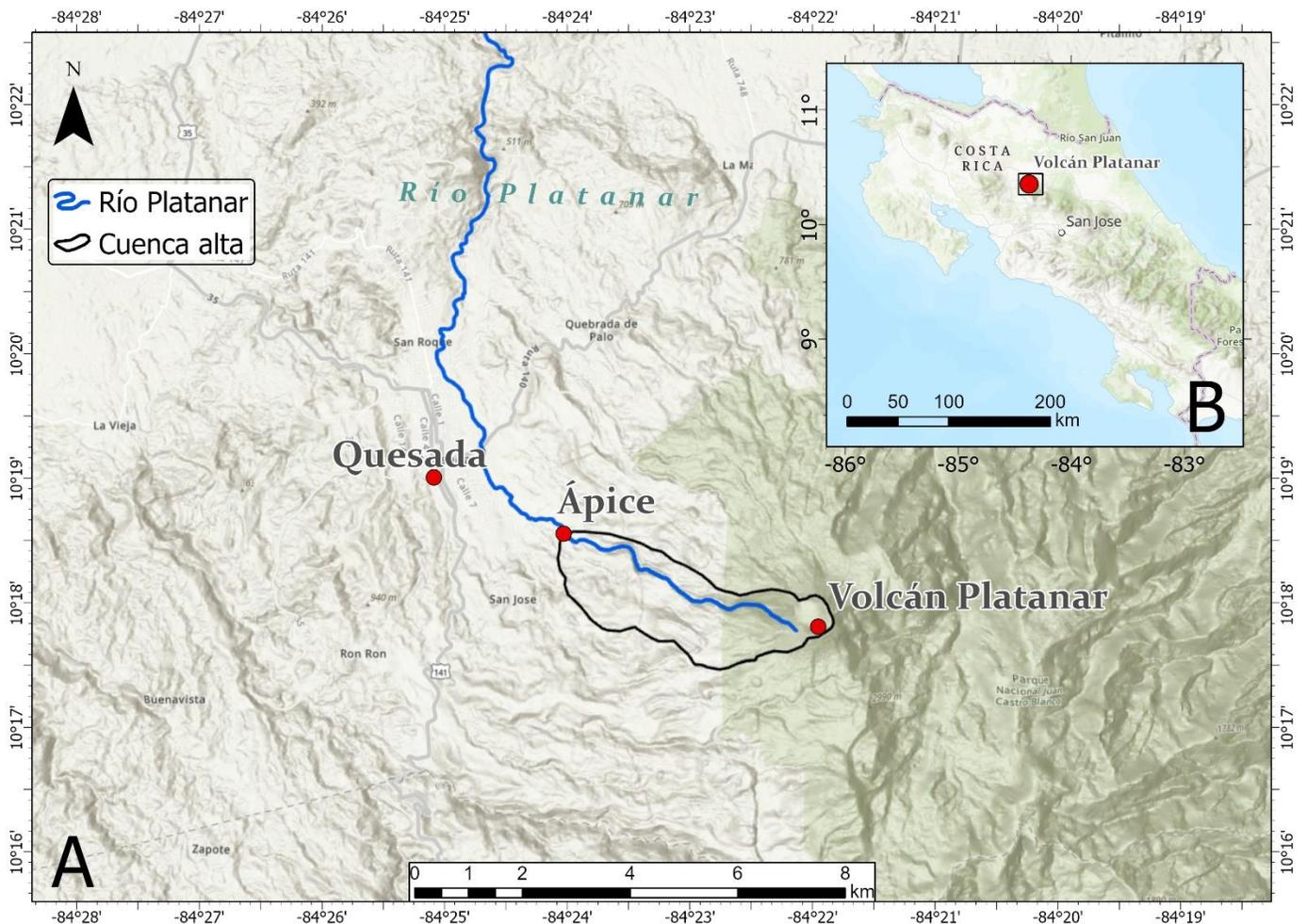
La cordillera volcánica Central de Costa Rica inicia con el volcán Porvenir (altitud 2267 m, altura 600 m, 15 km<sup>2</sup>, 2.5 km<sup>3</sup>) y con el volcán Platanar (altitud 2183 m, altura 1700 m, 70 km<sup>2</sup>, 61 km<sup>3</sup>), situado algo atrás del eje volcánico principal. Ambos volcanes no han presentado actividad eruptiva en tiempo histórico y se desconoce cuándo fueron sus últimas erupciones, dado que no se ha realizado dataciones de radiocarbono, por lo que no se sabe siquiera si presentaron actividad en el Holoceno. Ambos volcanes crecieron dentro de la caldera volcánica de Chocosuela (Alvarado y Carr, 1993; Alvarado 2021). Aunque volcánicamente inactivos en tiempo histórico, varios terremotos ( $M_w$  5.5-6.1) se han registrado en sus alrededores, donde todos ellos han disparado lahares; aunado a varios enjambres sísmicos en el propio volcán Platanar. Además, el grado de fallamiento es alto, la cobertura de suelos es igualmente espesa y propensa a los deslizamientos (Alvarado et al., 1988; Montero et al., 2010). Sumado a las condiciones geológicas de la cuenca, es importante tomar en cuenta que es una zona donde llueve en promedio entre los 2300-2500 mm al año según la regionalización climática de Costa Rica elaborada por el Instituto Meteorológico Nacional (Solano y Villalobos, 2000).

El volcán Platanar posee un cráter desportillado hacia el NW, desde donde nace en un profundo barranco volcánico el río Platanar. La cuenca desde donde nace parece corresponder con un antiguo deslizamiento de grandes dimensiones que fue agrandado por los procesos erosivos; el río discurre más o menos encajado hasta que llega al pie de monte donde está menos disectado.

Ciudad Quesada se ubica a unos 8 km al NW de la cima del volcán Platanar, desarrollada sobre un abanico aluvial coalescente producto de los ríos Platanar, Peje y la quebrada Gata. Puesto que la ciudad y varias urbanizaciones aledañas se ubican en el pie de monte del volcán, de ahí la importancia de realizar análisis que evidencie la eventual amenaza por eventos laháricos sobre estos lugares. Para ello, las simulaciones de lahares se desarrollaron en la cuenca alta del río Platanar, en la ladera oeste del volcán platanar, en el cantón de

San Carlos. El área de la cuenca es de 6.4 km<sup>2</sup> y se delimitó a partir de una interpretación del ápice del abanico aluvial del río Platanar, ya que a partir de dicho punto hay un cambio drástico de pendiente que altera el régimen hidráulico del río Platanar. La distancia del cráter principal del volcán Platanar (su piso a unos 2000 m s.n.m) al ápice (639 m s.n.m) es de aproximadamente 4.5 km y al centro de ciudad Quesada (Palacio Municipal) está a 7 km (Figura 1).

Ciudad Quesada se encuentra a una elevación media de 650 m s.n.m y posee una población estimada para el 2011 de 44 583 habitantes, por lo que es la ciudad más densamente poblada de la zona norte del país y con mayor extensión, alcanzando aproximadamente 10 km<sup>2</sup> (INEC, 2011). No se cuenta con datos actualizados de la población.



**Figura 1.** Ubicación geográfica de la cuenca alta del río Platanar. (B) El mapa muestra la ubicación del sitio de estudio en el cantón de San Carlos. (A) La figura muestra la cima del volcán Platanar, el ápice del abanico aluvial y ciudad Quesada.

## METODOLOGÍA

Se utilizó el programa de modelamiento hidráulico Flo-2D, los resultados de los modelos fueron sobrepuestos con información oficial de población e infraestructura del Instituto de Estadística y Censos (INEC), información catastral del cantón de San Carlos disponible en el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) y mapeos en campo.

### Análisis morfométrico de la cuenca y generación insumos para el modelo hidráulico

El análisis morfométrico de la cuenca y alrededores se basó en el procesamiento geomático de un modelo de elevación digital (DTM por sus siglas en inglés *Digital Terrain Model*) con resolución espacial de 10 m x 10 m píxel. Tres índices de relieve fueron calculados para interpretar las condiciones morfométricas del relieve; (i) pendientes, (ii) índice de rugosidad del terreno (TRI por sus siglas en inglés *Terrain Ruggedness Index*) e (iii) índice de transporte de sedimentos (STI por sus siglas en inglés *Sediment Transport Index*). La pendiente del relieve es un factor determinante en la generación de lahares, puesto que las condiciones topográficas pueden favorecer su disparo (Chen y Yu, 2011). Las pendientes se calcularon en el módulo de *Spatial Analyst* de ArcGIS Pro 2.5. La rugosidad de un terreno puede ser un indicador de procesos de superficie y geodinámica externa y es útil para identificar procesos deposicionales y erosivos (Bovis y Jakob, 1999). En geomorfología, los datos de rugosidad (TRI) pueden ser de gran utilidad para analizar depósitos fluviales y gravitacionales (Carrara et al., 2008). La rugosidad fue calculada en el Sig Saga 2.3 (Olaya y Conrad, 2009). Por su parte, el índice de transporte de sedimentos (STI por sus siglas *Sediment Transport Index*), por su parte, es un índice derivado del cálculo de la potencia de flujo (SPI por sus siglas *Stream Power Index*) (De Roo, 1998), el cual es de particular utilidad para identificar zonas propensas a generar sedimentos por procesos de erosión laminar y de remoción en masa como deslizamientos (Chen y Wang, 2017). STI fue calculado con la extensión de Whitebox 3.4 para ArcMap 10.8 (Lindsay, 2016). Los valores de los índices fueron estandarizados y determinada su autocorrelación espacial mediante el método de la I de Morán en el módulo de *Geostatistical Analyst* en ArcMap 10.8 (Scott y Janikas, 2010)

Los insumos de topográficos y de calibración hidráulica fueron preparados en la extensión de Flo-2D para QGIS 3.4 a partir del modelo de elevación (DTM) 10 m x 10 m, una imagen satelital Landsat-8 de 30 m de resolución espacial y adicionalmente imágenes de *Google Earth* con una resolución de 15 m. El DTM fue utilizado para elaborar los archivos de drenajes, llanura de inundación (*floodplain*), secciones transversales de canales y grilla de transmisión de flujos bidimensional (O'Brien et al., 1993). Las imágenes RGB (verdadero color) Landsat-8 y *Google Earth* fueron utilizadas para digitalizar la cobertura del uso del suelo de la cuenca alta y la mayoría de ciudad Quesada. La cobertura del suelo se clasificó en 3 categorías (Tabla 1); (i) zonas urbanizadas, (ii) zonas con vegetación y (iii) canal principal. Las categorías se les asignó un coeficiente de rugosidad de Manning; este determina la resistencia de un fluido al desplazarse sobre una determinada superficie (Zhang et al., 2010).

Las características de los lahares fueron calibradas a partir del informe del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) publicado en 1965, que al momento en Costa Rica sigue siendo un parámetro de referencia para la calibración de lahares por su detalle en los eventos de 1963-1965 en el volcán Irazú (ICE, 1965). De igual manera, la densidad específica de los lahares fue calibrada en función de los datos del ICE, donde un total de 73 muestras resultaron en un rango de densidad entre 1200 y 1980 kg/m<sup>3</sup>, con un promedio de 1540 kg/m<sup>3</sup>. La densidad, distribución de tamaño de partículas y concentración volumétrica, fueron también calibradas a partir del informe del ICE (Cuadro 1). El tiempo de simulación de los eventos fue de 45 minutos para simular un evento, repentino, veloz y una sola avenida aislada. Los eventos tratan de simular una inundación repentina o *flash flood* (Hapuarachchi et al., 2011).

En el cuadro 1 se presentan los parámetros de calibración del modelo hidráulico bidimensional. Los datos de rugosidad de Manning fueron obtenidos a partir de la fotointerpretación de una imagen satelital. Los parámetros de lahar fueron obtenidos a partir de ICE (1965). El tiempo de simulación fue definido arbitrariamente para emular una inundación repentina.

**Cuadro 1.** Parámetros de calibración del modelo hidráulico bidimensional.

Resolución topográfica (DTM)	10 mx10 m píxel
Coeficientes de Manning	n = 0.035 Canal principal
	n = 0.45-0.65 Vegetación
	n = 0.09 Zonas urbanizadas
Densidad del fluido	1540 kg/m <sup>3</sup>
Concentración volumétrica	C <sub>v</sub> = 0.51 %
Tiempo de simulación	45 min

Nota: Los datos de rugosidad de Manning fueron obtenidos a partir de la fointerpretación de una imagen satelital. Los parámetros de lahar fueron obtenidos a partir de ICE (1965). El tiempo de simulación fue definido arbitrariamente para simular una inundación repentina.

### Alcances y limitaciones del modelamiento hidráulico bidimensional

El modelamiento hidráulico de lahares es una técnica ampliamente reconocida a nivel mundial para brindar datos estadísticamente significativos para la toma de decisiones respecto a la gestión del riesgo de desastres (Cesca y D'Agostino, 2008; Calligaris et al., 2008; Wu et al., 2013). Los modelos hidráulicos han sido incorporados en la legislación y normativa para el ordenamiento territorial de múltiples países y estos modelos son continuamente actualizados de acuerdo con el crecimiento urbano y la dinámica poblacional (Coeur y Land, 2008; Mustafa et al., 2018; Park y Lee, 2019). Sin embargo, para que los modelos hidráulicos funcionen óptimamente, se necesitan insumos cruciales para la calibración. En primero lugar es necesario contar con información topográfica y de superficie de calidad que refleje adecuadamente las condiciones del terreno y la morfología de canales. La información de superficie es un insumo adicional, pero que se vuelve esencial a la hora de simular flujos en ambientes urbanos, donde la información altimétrica de superficie involucra todos aquellos objetos que no sean parte del terreno (infraestructura, vegetación y obstáculos antrópicos o naturales). Para ello, es necesario conocer el efecto que tienen las estructuras como puentes y edificios sobre el flujo simulado (Hashemi-Beni et al., 2018). Para la presente investigación se utilizó un modelo con resolución píxel de 10 m x 10 m, una resolución que bien da una fiel aproximación del comportamiento del lahar, pero no permite analizar los impactos de

estructuras ni mucho menos analizar con detalle el comportamiento adentro del canal (Cook y Merwade, 2009).

En segundo lugar, para modelar lahares o cualquier inundación se requiere de información hidrológica para la calibración (registro de caudales, curva de desgaste e información hidroclimatológica). Finalmente, en tercer lugar, se necesita información sedimentológica para calibrar el lahar, en términos de su distribución de partículas, densidad, relación agua-sedimentos, viscosidad cinemática entre otros parámetros (Manville et al., 2013).

Un total de 4 eventos de lahar fueron calibrados con diferentes hidrogramas elaborados en HEC-HMS. Los lahares fueron simulados en el software licenciado Flo-2D. Puesto que para la cuenca de estudio no hay información hidrológica disponible, por lo tanto, los caudales fueron definidos a partir del evento histórico del lahar de 1963 en el río Reventado (Evento 3), que tuvo un caudal máximo de 407 m<sup>3</sup>/s (ICE, 1965). A partir de dicho evento se calibraron dos eventos con menor intensidad y uno de mayor intensidad, todos con el mismo tiempo de simulación (45 minutos) (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Volúmenes acumulados y caudal máximo de los eventos simulados.

	Evento 1	Evento 2	Evento 3	Evento 4
Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )	34 200	58 500	197 100	288 450
Caudal máximo (m <sup>3</sup> /s)	76	130	407	640

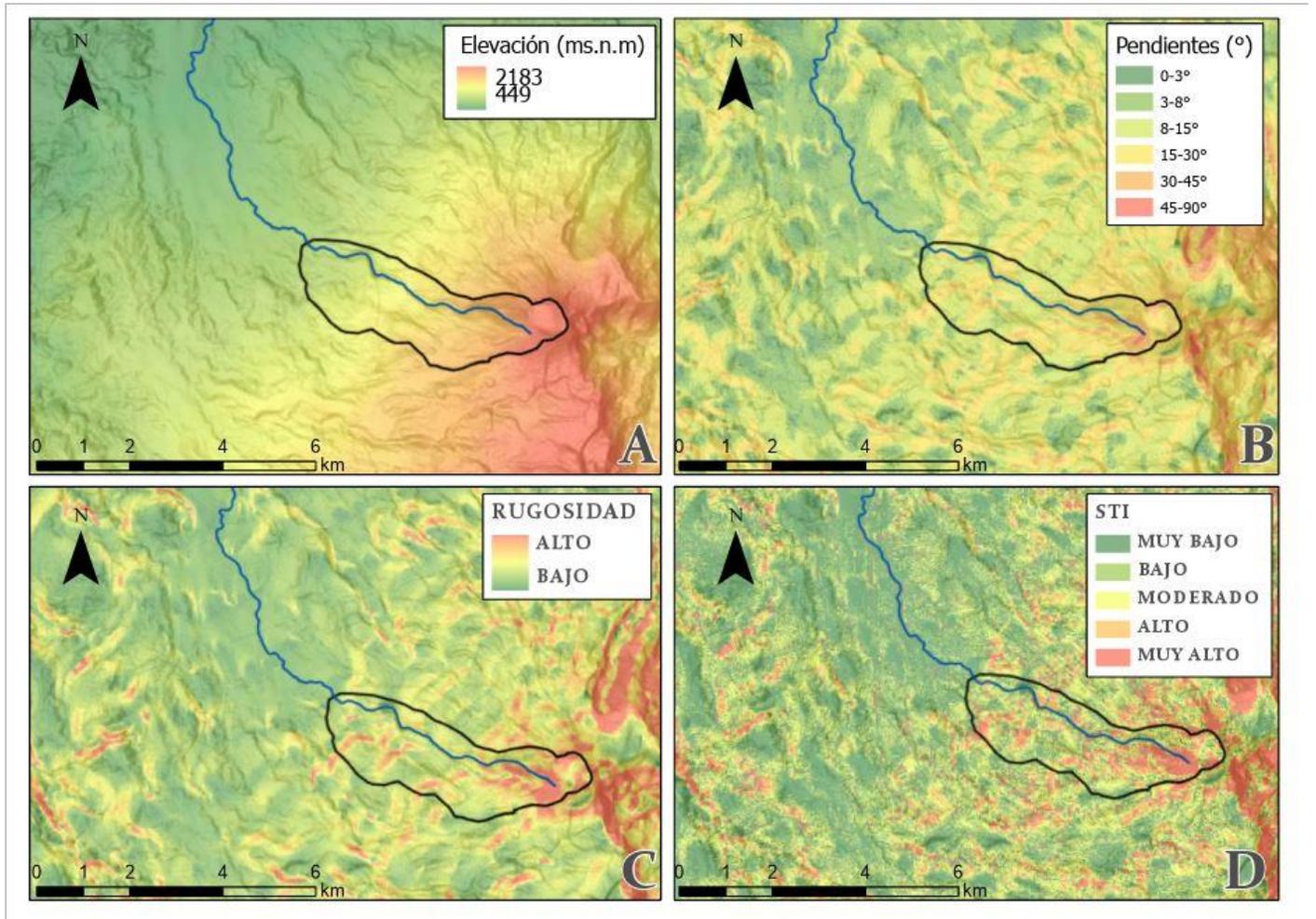
## ANÁLISIS

Los resultados de los modelos hidráulicos resultantes (Eventos 1, 2, 3 y 4, Cuadro 2) fueron sobrepuestos con información geoespacial oficial disponible. Para la población potencialmente afectada se realizó un análisis cruzado entre la extensión del evento de lahar con la información de unidades geoestadísticas mínimas (UGM) del censo del INEC (2011). La cantidad de infraestructura fue mapeada en campo con receptores Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) y, adicionalmente, estimada con información catastral del SNIT. Ambos análisis tanto de población e infraestructura fueron realizados en ArcGIS Pro 2.5. A pesar de las limitaciones respecto a la información necesaria para las calibraciones, los resultados muestran una aproximación satisfactoria del comportamiento de un lahar en ciudad Quesada.

50.8°. Las pendientes de la cuenca en su mayoría son fuertemente onduladas y exceden los 45°, en la parte más alta cercana al cráter, donde existen cicatrices de deslizamientos y zonas escarpadas que exceden los 60°. La rugosidad tiene un valor adimensional con un rango de 0 (bajo) a 1 (alto). El TRI indica una rugosidad media-alta en más del 75 % de la cuenca. En las partes más cercanas al cráter se observan los valores más altos. El promedio de STI de la cuenca muestra valores altos y muy altos en más del 60 % de la cuenca. Hay una correlación geoestadística significativa entre los 3 insumos (pendiente, TRI y STI). Los valores de las pruebas de hipótesis de correlación espacial entre variables mostraron  $I = 0.81$ , resultando en una fuerte relación entre índices. Los índices visualmente muestran una fuerte relación espacial en la parte alta de la cuenca y las laderas (Figura 2).

## Características morfométricas del relieve

La cuenca alta del río Platanar (delimitada a partir de su ápice estimado) tiene un área de 6.4 km<sup>2</sup> con un rango de elevación entre 2183 y 639 m s.n.m., con un promedio de 1323 m s.n.m. El río Platanar desciende aproximadamente 1300 m en menos de 4.6 km de recorrido. El rango de pendientes de la cuenca está entre 1° y 63°, con un promedio de



**Figura 2.** Índices morfométricos para la calibración e interpretación de lahares en la cuenca del río Platanar. A) Elevaciones, B) Pendientes, C) Rugosidad y D) STI. Los valores más altos de pendientes, rugosidad y STI se encuentran en cercanos al cráter, por encima de los 1900 m s.n.m, en la parte baja de la cuenca los valores de todos los índices disminuyen.

Los índices del relieve de la cuenca dan indicios de que el río Platanar tiene el potencial para generar eventos de lahar. El sector oeste del cráter del volcán Platanar muestra los valores más altos de todos los índices del relieve. Una fotografía aérea muestra un risco de aproximadamente 300 m de altura (Figura 3). Las paredes del risco tienen evidencia de desprendimientos y muestran una serie de drenajes con pendientes superiores a los

70°, formando una serie de cascadas. Dados los resultados de los índices del relieve, se considera que el sitio mostrado es el lugar más propenso para generar un evento de lahar. Por ello, fue definido como punto de partida para los lahares que potencial y eventualmente podrían afectar a ciudad Quesada (Figura 3).

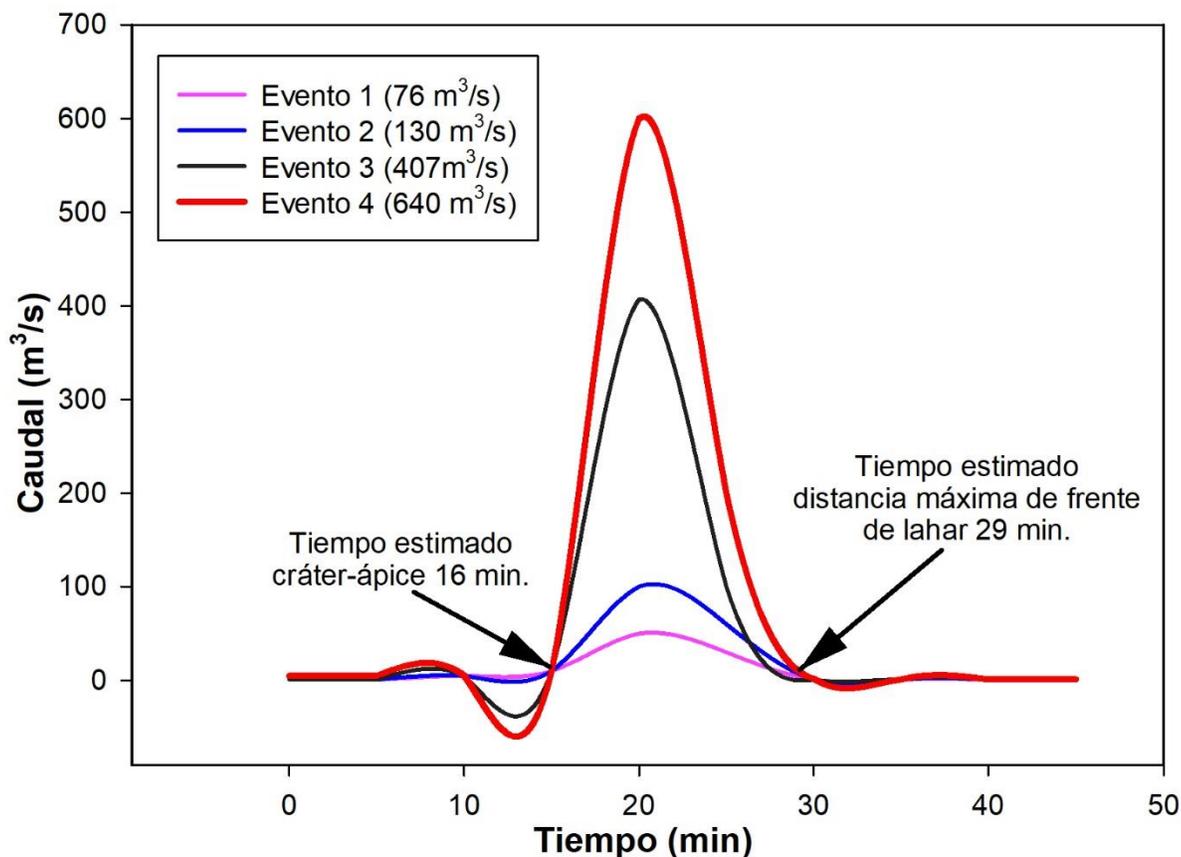


**Figura 3.** Fotografía aérea oblicua de la cima del volcán Platanar (2183 m s.n.m) y el punto de partida (1767 m s.n.m) de las simulaciones de lahar en la cuenca. Nótese la fuerte pendiente ( $>60^\circ$ ) del risco entre el cráter del Platanar y el punto de inicio de las simulaciones. Fotografía de Douglas Vargas (web RSN).

### Escenarios de lahar en el río Platanar

Los lahares simulados tardaron en promedio 16 minutos desde el inicio del recorrido en la cima del volcán Platanar hasta llegar al ápice del abanico aluvial. La velocidad promedio de los flujos es de

3.2 m/s (11.5 km/h). En las partes intermedias de la cuenca la velocidad del flujo puede llegar a los 4.8 m/s (17.2 km/h). Los lahares al llegar al ápice duran de 13 a 16 minutos de avance frontal y se detienen luego de 29 minutos a partir de su salida en el cráter del volcán (Figura 4).

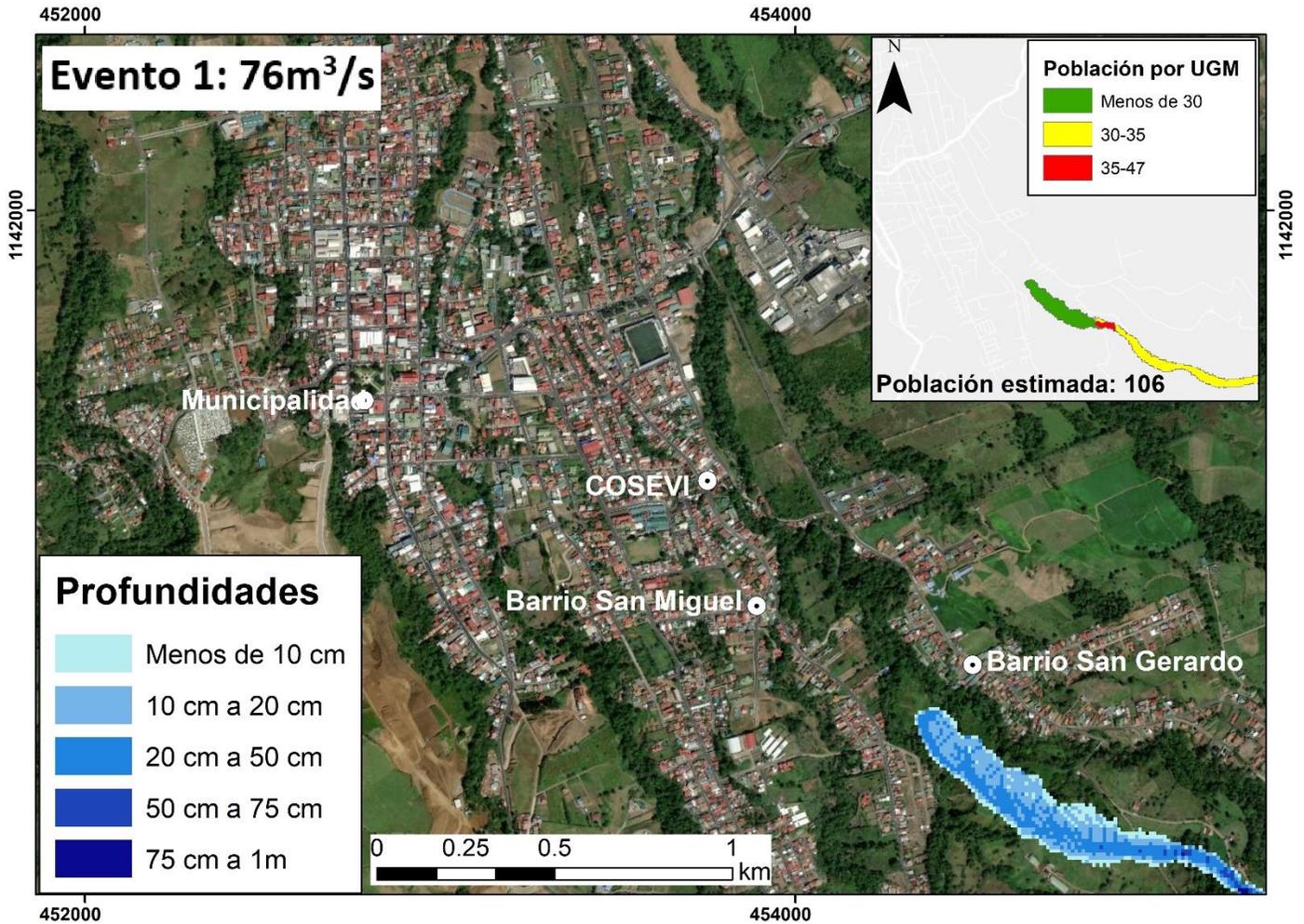


**Figura 4.** Hidrogramas de los lahares simulados. Los lahares duran aproximadamente 16 minutos desde el cráter del volcán Platanar al ápice.

La geomorfología fluvial de la cuenca juega un papel importante en el comportamiento de los lahares. En términos generales, los ríos tienen valles disectados y profundos, de laderas abruptas, que confinan los lahares. El río luego de alcanzar el punto de ápice continúa en secciones disectadas y profundas durante su recorrido por ciudad Quesada, por ello resulta importante tener en cuenta las características de la geomorfología fluvial a la hora de interpretar las simulaciones, ya que explican los sitios de desbordamiento e inundación.

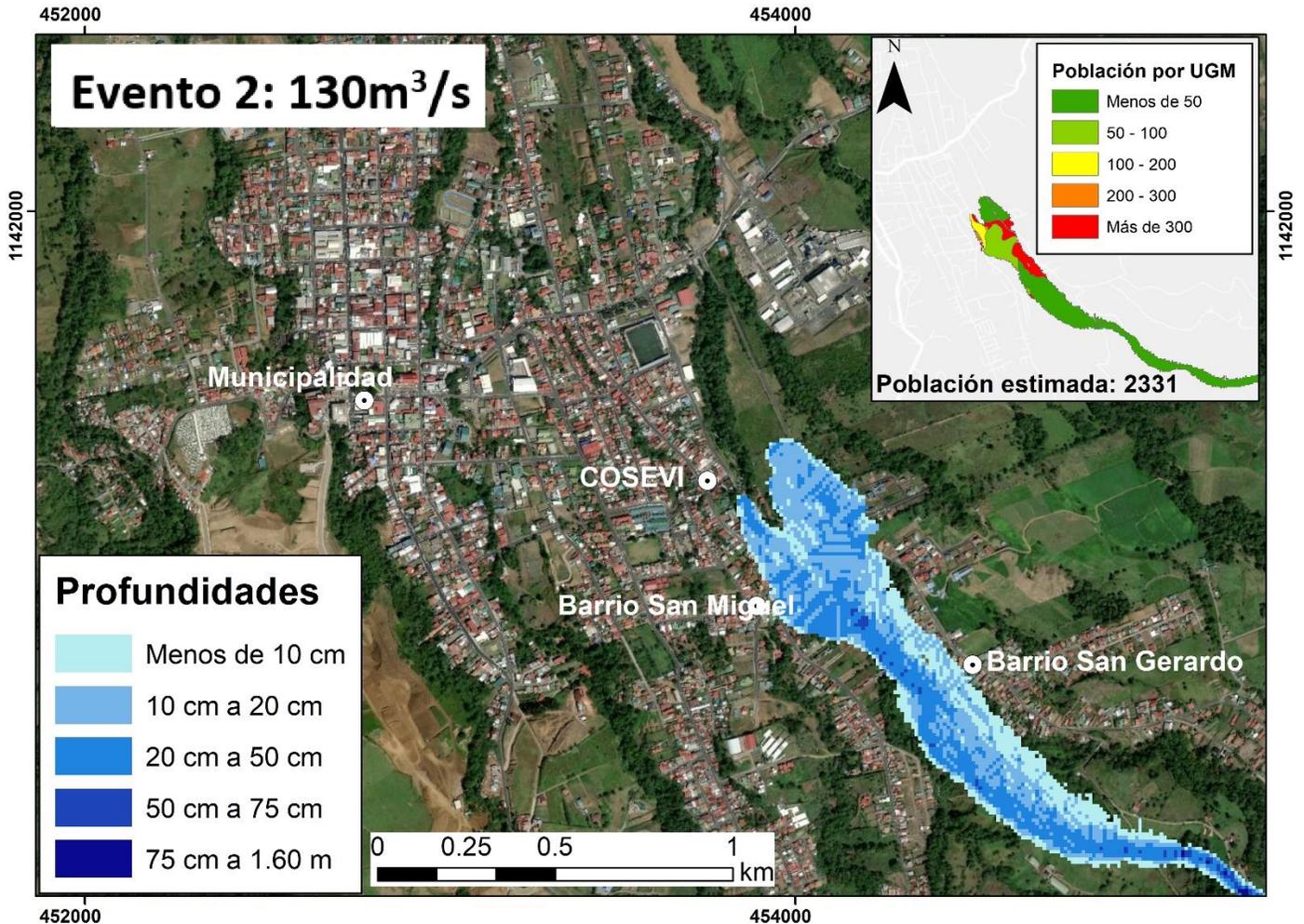
confinado en el cañón del río. El modelo muestra un área potencial de inundación de 9.07 hectáreas, sin embargo, las profundidades serían por debajo de los 20 cm. Los desbordamientos del río alcanzan una profundidad máxima de 20 cm. La profundidad máxima registrada en este evento es de 1.1 m y ocurre en el cauce principal del río. La simulación indica que un evento de esta magnitud no afectaría la ciudad. Sin embargo, dejaría gran cantidad de material disponible adentro del cauce, con una profundidad promedio de 0.6 m.

El evento 1 tuvo un acumulado de sedimentos transportados de 34 200 m<sup>3</sup> en 45 minutos. El caudal máximo del evento alcanzó 76 m<sup>3</sup>/s (Figura 5). Este evento se mantiene en su mayoría



**Figura 5.** Evento 1 de simulación de lahares en ciudad Quesada. El mapa muestra la extensión y profundidad del lahar. El flujo mayor se extiende a una altitud aproximada de 845 m s.n.m. Sistema de coordenadas CRTM05.

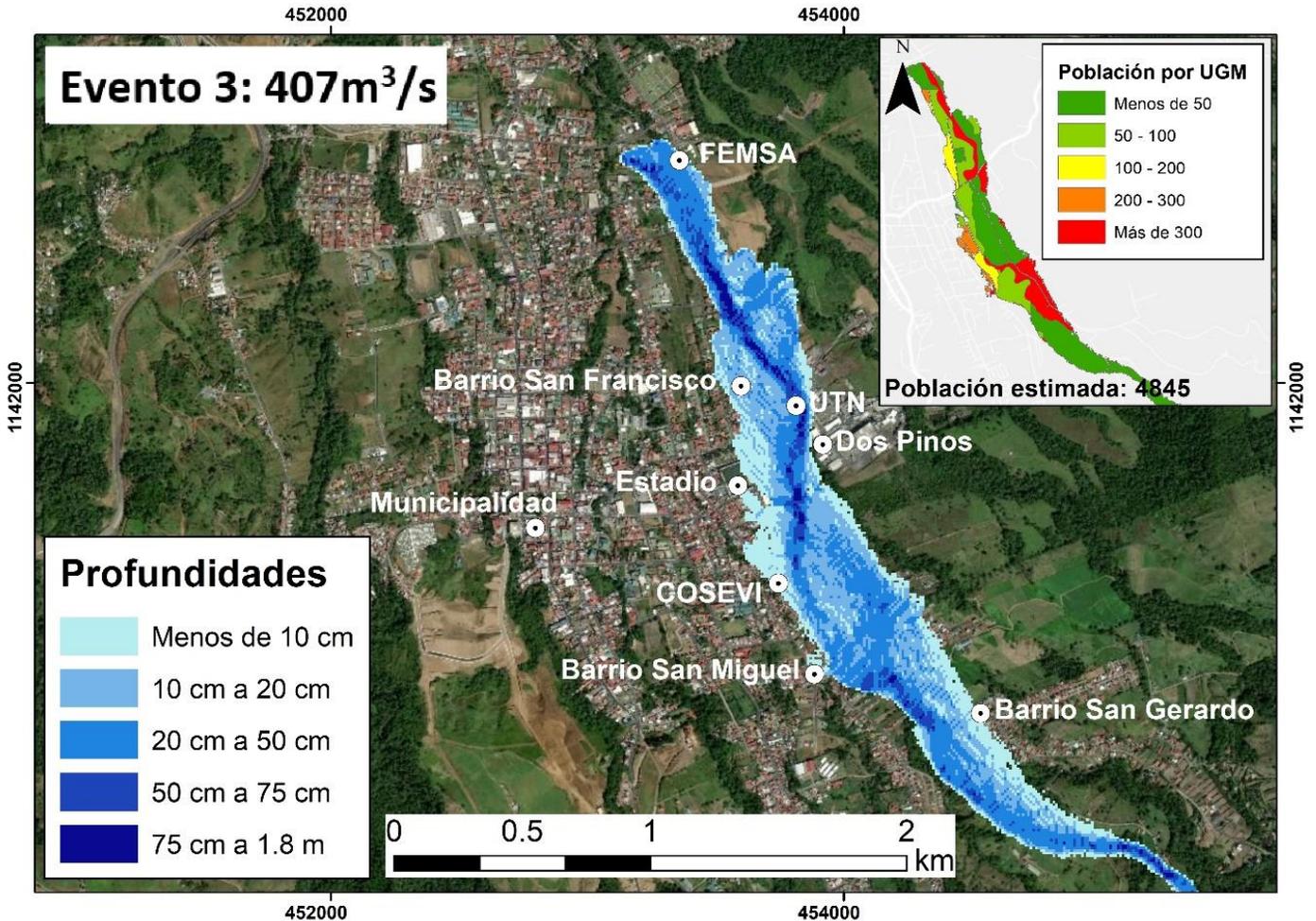
El evento 2 tuvo un acumulado de 58 500 m<sup>3</sup> en 45 minutos (Figura 6). El caudal máximo es de 130 m<sup>3</sup>/s. Este evento presentó un desbordamiento pequeño en ambos lados del cauce generando inundaciones entre los 10 cm y 75 cm de profundidad. La extensión de la inundación se estimó en 46.6 hectáreas. La mayor profundidad se registró en el cauce con 1.6 m. Las inundaciones que afectan zonas pobladas no exceden los 75 cm de profundidad. El lahar se detiene cercano al plantel de COSEVI de la ciudad.



**Figura 6.** Evento 2 de simulación de lahares en ciudad Quesada. El mapa muestra la extensión y profundidad del lahar. El flujo principal alcanza hasta una altitud aproximada de 691 m s.n.m. Sistema de coordenadas CRTM05.

El evento 3 es una recreación aproximada del lahar ocurrido en diciembre de 1963 en el río Reventado, Cartago. Tuvo un acumulado de material transportado 197 100 m<sup>3</sup> en 45 minutos (Figura 7). El caudal máximo fue de 407 m<sup>3</sup>/s. Este evento genera una importante inundación estimada en 100 hectáreas. El 85 % del área de inundación alcanza profundidades menores a los 50 cm. Las mayores profundidades se registran en el canal principal y zonas cercanas al río, especialmente en

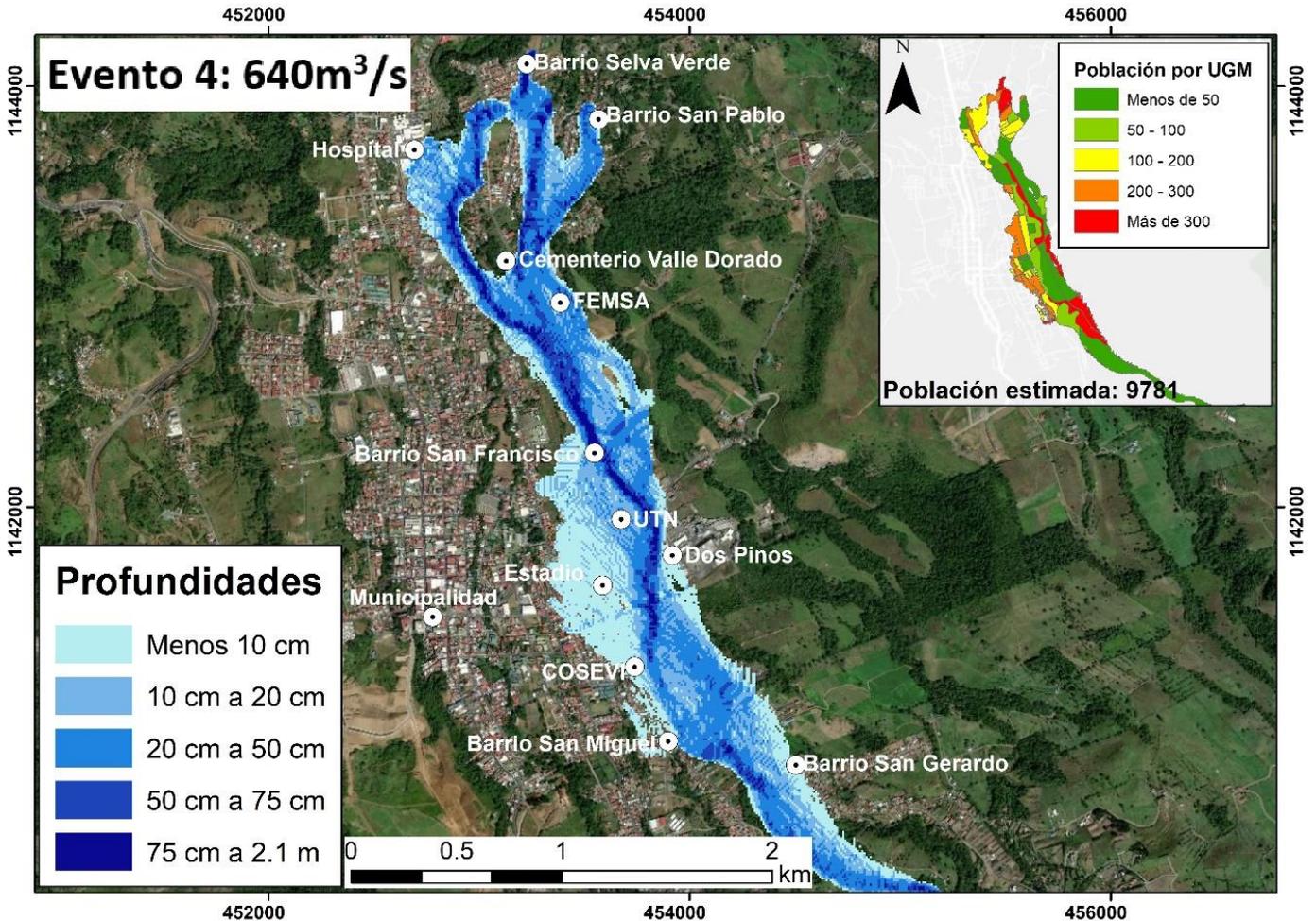
secciones de deflexión del río. Estas curvas en el canal generan importantes desbordamientos posiblemente intensa erosión lateral en el canal. La mayor profundidad del evento es de 1.8 m. Zonas adyacentes al canal (>15 m de distancia) alcanzan profundidades de hasta 1.4 m. El evento con mayor carga de sedimentos llegaría hasta las cercanías de la industria FEMSA con una altitud de 580 m s.n.m.



**Figura 7.** Evento 3 de simulación de lahares en ciudad Quesada. El mapa muestra la extensión y profundidad del lahar. El lahar mayor alcanza hasta una altitud aproximada de 580 m s.n.m. Sistema de coordenadas CRTM05.

El evento 4 es el de mayor magnitud, con 288 450 m<sup>3</sup> de material transportado y un caudal máximo de 640 m<sup>3</sup>/s, por lo que causaría una gran inundación en la ciudad, superando 218 hectáreas (Figura 8). Claramente este evento es el menos probable de ocurrir. Más del 70 % del área potencialmente afectada alcanzaría profundidades entre los 50 cm y 1.5 m. Las mayores profundidades se registraron en el cauce principal con un máximo de 2.1 m. A la altura del cementerio Valle Dorado ocurre una

bifurcación del flujo, donde las condiciones topográficas causan una desviación hacia el noreste en dirección a barrio San Pablo. El flujo mayor se detiene en 3 sitios (530 m s.n.m): hospital de San Carlos, barrio Selva Verde y barrio San Pablo. A pesar de la magnitud del evento, la mayoría del material se mantiene en el cauce, dadas las condiciones geomorfológicas del río (canal disectado profundo con laderas verticales).



**Figura 8.** Evento 4 de simulación de lahares en ciudad Quesada. El mapa muestra la extensión y profundidad del lahar. El lahar mayor se detiene a una altitud aproximada de 530 m s.n.m. Sistema de coordenadas CRTM05.

## CONCLUSIONES

La cuenca alta del río Platanar tiene un terreno rugoso y escarpado, caracterizado por fuertes pendientes, gran espesor de suelos volcánicos, alta precipitación pluvial, donde los índices muestran un importante potencial para movilizar grandes volúmenes de sedimentos. A pesar de las limitaciones respecto a la información base para la calibración de los eventos, los modelos muestran satisfactoriamente la extensión, profundidad y velocidad de diferentes eventos de lahares, ya sea disparados por sismos, lluvias intensas o actividad volcánica, aportando una aproximación de los posibles impactos que tendría en ciudad Quesada. La cantidad de población e infraestructura que podría ser afectada depende directamente de la magnitud del evento. El menor evento, de acuerdo con la simulación, aparenta no representar un peligro para la ciudad, sin embargo, eventos mayores sugieren la afectación de cientos de

estructuras y miles de personas viviendo adentro del área potencial de inundación. Claramente, los eventos 3 y 4 son menos probables, aunque un sismo importante en temporada de lluvia podría disparar un lahar similar a los que se han presentado en la cuenca alta de los ríos Toro y Sarapiquí en tiempo histórico.

La cantidad de personas que viven en el área de inundación fue estimada a partir de los datos del censo 2011 (INEC), algo antigua pero la única disponible, por lo que probablemente la población actual de ciudad Quesada ronde los 50 000 habitantes o más. Mientras que la cantidad de infraestructura fue calculada a partir levantamientos en campo y la consulta de la información catastral disponible en el SNIT para el 2019. El cuadro 3 resume los posibles efectos de los lahares en la ciudad.

**Cuadro 3.** Posibles efectos de los lahares en ciudad Quesada.

	Evento 1	Evento 2	Evento 3	Evento 4
Población estimada por UGM	106	2331	4845	9781
Estructuras potencialmente afectadas	9	67	219	804
Área potencial de inundación (ha)	9.0	46.6	99.9	218.1
Recorrido (km)	4.1	5.8	7.1	8.2
Profundidad máxima (m)	1.1	1.6	1.8	2.1
Velocidad máxima en el ápice (km/h)	8.2	11.5	16.2	17.2

Como es de esperar, la cantidad de estructuras y población potencialmente afectada aumenta conforme aumenta el área potencial de inundación. El evento 1 muestra poca afectación en cuanto a estructuras, principalmente puentes y obras viales. Según los UGM, la cantidad de población es de 106 personas. El evento 2 aumenta más de 20 veces la cantidad de población que podría ser afectada, esto porque el lahar inunda algunos barrios residenciales como San Gerardo. La infraestructura identificada ronda las 50 viviendas y algunos puentes y obras viales. El evento 3 (réplica del río Reventado en 1963) aumenta considerablemente la probabilidad de afectar población e infraestructura, donde 4845 personas viven adentro del área de inundación según los UGM y se estimaron más de 200 estructuras que podrían ser afectadas, incluyendo varios comercios, estructuras gubernamentales, gasolineras, escuelas y líneas vitales como la subestación eléctrica de la ciudad. De acuerdo con las simulaciones y la sobreposición de información levantada, el evento 4 de mayor magnitud tiene una preocupante capacidad para afectar la ciudad, superando las 9000 personas y alrededor de 800 estructuras que podrían ser afectadas.

### RECOMENDACIONES

Los resultados de estas simulaciones, pese a las limitaciones del modelamiento hidráulico bidimensional, deberían de aplicarse a diversos poblados y ciudades ubicadas en abanicos aluviales activos y piedemontes (volcánicos o no), para una adecuada gestión del riesgo y

ordenamiento territorial, para realizar una mejor planificación del desarrollo urbano e industrial, destinando sectores con peligrosidad elevada para otros usos (cultivos, ganadería, parques, instalaciones deportivas).

Tal y como se dijo al inicio, desgraciadamente, los únicos datos completos sobre eventos laháticos están en el antiguo informe del ICE (1965), por lo que se recomienda que estudios similares se realicen con el fin de contar con información similar en otras cuencas.

Finalmente, se llama la atención que se desconoce cuándo fue el último periodo eruptivo del Platanar. Aunque las capas piroclásticas poseen un estado avanzado de meteorización y suelos espesos se han desarrollado, resulta imperante tener datos radiométricos de los últimos periodos eruptivos con el fin de tener una mejor estimación de la peligrosidad volcánica.

**Agradecimientos:** Al Dr. Christian Birkel y los proyectos 217-C0-168-UCR Geomorfología Fluvial de Alta Resolución en Costa Rica, OACG (ED-3319) y UCREA (B8276) por el financiamiento y colaboración en esta investigación. Un especial agradecimiento a los estudiantes de los grupos 1-2 del curso de Cartografía Básica UCR II-2019, por su colaboración en la recolección de información en el campo. Un agradecimiento especial a los dos revisores por sus sugerencias y correcciones en este texto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, I. y Alvarado, G. E. (2014). Pérdidas humanas y económicas causadas por el vulcanismo en Costa Rica entre 1953 y 2005. *Revista Geológica de América Central*, 51, 93-128.
- Alvarado, G. E. (2010). Aspectos geohidrológicos y sedimentológicos de los flujos de lodo asociados al terremoto de Cinchona (Mw 6, 2) del 8 de enero del 2009, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 43, 67-96.
- Alvarado, G. E. (2021). *Costa Rica y sus volcanes*. EUCR, EUNA ETCR, San José.
- Alvarado, G. E. y Carr, M. J. (1993). The Platanar-Aguas Zarcas volcanic centers, Costa Rica: spatial-temporal association of Quaternary calc-alkaline and alkaline volcanism. *Bull. Volcanol.*, 55, 443-453.
- Alvarado, G. E., Fallas, B., Vargas, V., Vega, E., Bakkar, H., y Barrantes, G. (2017). Los lahares del volcán Miravalles disparados por el huracán Otto (24 de noviembre del 2016), Costa Rica: Meteorología, sedimentología, periodos de recurrencia, alerta temprana y recomendaciones. Instituto Costarricense de Electricidad [Informe interno].
- Alvarado, G. E., Morales, L. D., Montero, W., Climent, Á. y Rojas, W. (1988). Aspectos sismológicos y morfotectónicos del extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central. *Revista Geológica de América Central*, 9, 75-98.
- Alvarado, G. E., y Schmincke, H. U. (1994). Stratigraphic and sedimentological aspects of the rain triggered lahars of the 1963-1965 Irazú eruption, Costa Rica. *Zbl. Geol. Palaont. Teil*, 1, 513-530.
- Bovis, M. J., y Jakob, M. (1999). The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth surface processes and landforms*, 24(11), 1039-1054.
- Calligaris, C., Boniello, M. A., y Zini, L. (2008). Debris flow modelling in Julian Alps using FLO-2D. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 60, 81-88.
- Carrara, A., Crosta, G., & Frattini, P. (2008). Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology*, 94(3-4), 353-378.
- Cesca, M., y D'Agostino, V. (2008). Comparison between FLO-2D and RAMMS in debris-flow modelling: a case study in the Dolomites. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 60, 197-206.
- Chen, C. Y., y Wang, Q. (2017). Debris flow-induced topographic changes: effects of recurrent debris flow initiation. *Environmental monitoring and assessment*, 189(9), 449.
- Chen, C. Y., y Yu, F. C. (2011). Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS. *Geomorphology*, 129(3-4), 387-397.
- Cœur, D., y Lang, M. (2008). Use of documentary sources on past flood events for flood risk management and land planning. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(9-10), 644-650.
- Cook, A., & Merwade, V. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration, and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 131-142.
- De Roo, A. P. J. (1998). Modelling runoff and sediment transport in catchments using GIS. *Hydrological processes*, 12(6), 905-922.
- Fagents, S. A., Gregg, T. K., & Lopes, R. M. (Eds.). (2013). *Modeling volcanic processes: the physics and mathematics of volcanism*. Cambridge University Press.
- Hapuarachchi, H. A. P., Wang, Q. J., y Pagano, T. C. (2011). A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrological processes*, 25(18), 2771-2784.
- Hashemi-Beni, L., Jones, J., Thompson, G., Johnson, C., y Gebrehiwot, A. (2018). Challenges and opportunities for UAV-based digital elevation model generation for flood-risk management: A case of Princeville, North Carolina. *Sensors*, 18(11), 3843.
- ICE. (1965). *Informe sobre el problema del río Reventado*. Instituto Costarricense de Electricidad, San José [Informe interno].
- INEC. (2011). *X censo nacional de población y VI de vivienda 2011: características sociales y demográficas*. Costa Rica: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.

- Janda, R. J., Scott, K. M., Nolan, K. M., Martinson, H. A., Lipman, P. W., y Mullineaux, D. R. (1981). Lahar movement, effects, and deposits.
- Lindsay, J. B. (2016). Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis. *Computers & Geosciences*, 95, 75-84.
- Montero, W., Soto, G. J., Alvarado, G. E. y Rojas, W. (2010). División del deslizamiento tectónico y transtensión en el macizo del volcán Poás (Costa Rica), basado en estudios neotectónicos y de sismicidad histórica. *Revista Geológica de América Central*, 43, 13-36.
- Mustafa, A., Bruwier, M., Archambeau, P., Ercicum, S., Piroton, M., Dewals, B., y Teller, J. (2018). Effects of spatial planning on future flood risks in urban environments. *Journal of environmental management*, 225, 193-204.
- O'Brien, J. S., Julien, P. Y., & Fullerton, W. T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of hydraulic engineering*, 119(2), 244-261.
- Okunishi, K., y Suwa, H. (2001). Assessment of debris-flow hazards of alluvial fans. *Natural Hazards*, 23(2-3), 259-269.
- Olaya, V., y Conrad, O. (2009). Geomorphometry in SAGA. *Developments in soil science*, 33, 293-308.
- Papanicolaou, A. T. N., Elhakeem, M., Wilson, C. G., Burras, C. L., West, L. T., Lin, H. H., ... y Oneal, B. E. (2015). Spatial variability of saturated hydraulic conductivity at the hillslope scale: Understanding the role of land management and erosional effect. *Geoderma*, 243, 58-68.
- Park, K., y Lee, M. H. (2019). The development and application of the urban flood risk assessment model for reflecting upon urban planning elements. *Water*, 11(5), 920.
- Scott, L. M., y Janikas, M. V. (2010). Spatial statistics in ArcGIS. In *Handbook of applied spatial analysis* (pp. 27-41). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Scotti, V., Giannini, M., y Cioffi, F. (2020). Enhanced flood mapping using synthetic aperture radar (SAR) images, hydraulic modelling, and social media: A case study of Hurricane Harvey (Houston, TX). *Journal of Flood Risk Management*, e12647.
- Solano, J., & Villalobos, R. (2000). Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. San José: Instituto Meteorológico Nacional. Instituto Meteorológico Nacional. Recuperado de [www.imn.ac.cr](http://www.imn.ac.cr).
- Wu, Y. H., Liu, K. F., y Chen, Y. C. (2013). Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study. *Journal of Mountain Science*, 10(2), 293-304.
- Zegers, G., Mendoza, P. A., Garces, A., y Montserrat, S. (2020). Sensitivity and identifiability of rheological parameters in debris flow modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(7), 1919-1930.
- Zhang, G. H., Luo, R. T., Cao, Y., Shen, R. C., y Zhang, X. C. (2010). Impacts of sediment load on Manning coefficient in supercritical shallow flow on steep slopes. *Hydrological Processes*, 24(26), 3909-3914.