

Zonas de amenaza por inundación en Quebrada Hornillas, Río Guayabo y Río Cuipilapa usando sensores remotos, análisis hidrológico e hidráulico

Informe Técnico
Proyecto de Investigación N°340-B7-522-21
Universidad de Costa Rica



Preparado para:

Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias

Elaborado por:

Alejandra M. Rojas González, Ph.D.
Escuela de Ingeniería de Biosistemas, Universidad de Costa Rica

Fecha: 30 de agosto, 2023



TABLA DE CONTENIDO

1	Resumen Ejecutivo.....	1
2	Introducción	2
2.1	Propósito del estudio.....	2
2.2	Alcance del trabajo	2
3	Descripción del área de estudio.....	3-3
3.1	Localización.....	3-3
3.2	Características morfométricas de las subcuencas y red de drenaje.....	3-4
3.2.1	Delimitación del área de estudio	3-4
3.2.2	Red Hidrográfica	3-6
3.2.3	Parámetros de forma de las subcuencas	3-8
3.2.4	Parámetros de relieve de las subcuencas	3-9
4	Análisis Hidrológico	4-13
4.1	Cobertura del terreno	4-15
4.2	Tipos de Suelos	4-17
4.3	Número de curva.....	4-20
4.4	Tiempo de concentración.....	4-22
4.5	Datos de Precipitación y tormenta de diseño.....	4-24
4.5.1	Caracterización del Huracán Otto y análisis de precipitación.....	4-24
4.6	Resultados de Simulación Hidrológica.....	4-27
4.6.1	Resultados del análisis hidrológico	4-27
5	Modelación hidráulica.....	5-29
5.1	Zona de estudio hidráulico.....	5-29
5.2	Visitas de Campo.....	5-31
5.3	Geometría del río y de las planicies para la modelación	5-36
5.4	Coeficientes de rugosidad.....	5-37
5.5	Condiciones de borde y régimen de flujo	5-39
5.6	Escenarios hidráulicos	5-42
5.6.1	Análisis hidráulico para condiciones de Otto y agua limpia	5-42
5.6.2	Análisis hidráulico para condiciones del Huracán Otto y flujo de lodos	5-50



5.6.3	Análisis Hidráulico para condiciones existentes para periodos de retorno .5-54
5.6.4	Análisis de continuidad en el modelo.....5-65
5.6.5	Resumen de Análisis Hidráulicos.....5-66
6	Conclusiones6-69
7	Referencias7-70
8	Equipo de trabajo8-71
9	Apéndices9-1

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 Mapa de localización de la Cuenca de Guayabo y Cuipilapa.	3-4
Figura 3-2. Subcuencas para el Río Guayabo y Quebrada Hornillas.	3-5
Figura 3-3. Subcuencas para el Río Cuipilapa.	3-5
Figura 3-4. Modelos de elevación digital para Cuipilapa (izquierda) y Guayabo (derecha).	3-7
Figura 3-5. Pendientes en la subcuenca de Cuipilapa.	3-10
Figura 3-6 Pendientes en la subcuenca de Guayabo.	3-10
Figura 3-7 Curva Hipsométrica para Cuipilapa.	3-11
Figura 3-8 Curva Hipsométrica para Guayabo.	3-11
Figura 4-1 Configuración de los modelos hidrológicos en HEC-HMS. A) Modelo Cuipilapa, B) Modelo Guayabo	4-13
Figura 4-2 Cobertura para la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas con su respectiva clasificación.	4-16
Figura 4-3 Cobertura para la zona de Cuipilapa con su respectiva clasificación.	4-17
Figura 4-4 Precipitación acumulada del Huracán Otto.	4-25
Figura 4-5 Distribución promedio de tormenta 12 horas del Huracán Otto.	4-26
Figura 4-6. Pico de salida del modelo de Cuipilapa.	4-27
Figura 4-7 Pico de salida del modelo de Guayabo.	4-29
Figura 5-1 Mapa de la ubicación de la zona de modelaje hidráulico para Río Guayabo y Quebrada Hornillas.	5-30
Figura 5-2 Mapa de la ubicación de la zona de modelaje hidráulico para el Río Cuipilapa.	5-31
Figura 5-3. Fotos del cauce del río Cuipilapa en su parte baja y alta respectivamente.	5-32
Figura 5-4 Fotos de la Quebrada Hornillas.	5-33
Figura 5-5 Fotos de la topografía y cauces cercanos al pueblo de Guayabo.	5-34
Figura 5-6 Puntos de interés en Cuipilapa.	5-35
Figura 5-7 Puntos de interés para Guayabo y Quebrada Hornillas.	5-36
Figura 5-8 Modelo de elevación digital en el área del estudio bidimensional para Cuipilapa	5-37
Figura 5-9 Mapa de uso de suelos afinado para la zona de Cuipilapa.	5-38
Figura 5-10 Mapa de uso de suelos afinado para la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas.	5-39
Figura 5-11 Ubicación de las entradas y salidas de agua en la zona de Cuipilapa	5-40
Figura 5-12 Ubicación de las entradas y salidas de agua en la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas ..	5-41
Figura 5-13. Profundidad de agua para Cuipilapa con CN tipo II y agua limpia para el Huracán Otto. ...	5-43
Figura 5-14 Velocidad de agua para Cuipilapa con CN tipo II y agua limpia.	5-44
Figura 5-15 Profundidad de agua para Cuipilapa con CN tipo III y agua limpia	5-45
Figura 5-16 Velocidad de agua para Cuipilapa con CN tipo III y agua limpia.	5-46
Figura 5-17 Profundidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II.	5-47
Figura 5-18 Velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II.	5-48
Figura 5-19 Profundidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo III.	5-49
Figura 5-20 Velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo III para el Huracán Otto. 5-50	
Figura 5-21 Profundidad de agua para Cuipilapa con CN tipo II y CV:0.5.	5-51
Figura 5-22 Velocidad de agua para Cuipilapa con CN tipo II y CV:0.5	5-52
Figura 5-23 Profundidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II y CV:0.5.	5-53
Figura 5-24 Velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II y CV:0.5.	5-54
Figura 5-25 Profundidad y velocidad de agua para Cuipilapa con un periodo de retorno de 5 años.	5-55

<i>Figura 5-26 Profundidad y velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con un periodo de retorno de 5 años.....</i>	<i>5-56</i>
<i>Figura 5-27 Profundidad y velocidad de agua para Cuipilapa con un periodo de retorno de 10 años.</i>	<i>5-57</i>
<i>Figura 5-28 Profundidad y velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con un periodo de retorno de 10 años.....</i>	<i>5-58</i>
<i>Figura 5-29 Profundidad y velocidad de agua para Cuipilapa con un periodo de retorno de 25 años.</i>	<i>5-59</i>
<i>Figura 5-30 Profundidad y velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con un periodo de retorno de 25 años.....</i>	<i>5-60</i>
<i>Figura 5-31 Profundidad y velocidad de agua para Cuipilapa con un periodo de retorno de 50 años.</i>	<i>5-61</i>
<i>Figura 5-32 Profundidad y velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con un periodo de retorno de 50 años.....</i>	<i>5-62</i>
<i>Figura 5-33 Profundidad y velocidad de agua para Cuipilapa con un periodo de retorno de 100 años</i>	<i>5-63</i>
<i>Figura 5-34 Profundidad y velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con un periodo de retorno de 100 años.....</i>	<i>5-64</i>
<i>Figura 5-35 Ubicación de perfiles seleccionados para Cuipilapa.....</i>	<i>5-65</i>
<i>Figura 5-36 Perfil número 4 para el modelo de Cuipilapa.....</i>	<i>5-66</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 3-1 Parámetros de longitud y pendiente promedio para cauces principales.....</i>	<i>3-6</i>
<i>Tabla 3-2 Densidad de drenaje para las subcuencas.....</i>	<i>3-7</i>
<i>Tabla 3-3. Valores de interpretación de índice de forma.....</i>	<i>3-8</i>
<i>Tabla 3-4 Parámetros de forma de las subcuencas.....</i>	<i>3-9</i>
<i>Tabla 4-1 Distribución de las Uniones o “Junction” del modelo hidrológico de Cuipilapa.....</i>	<i>4-14</i>
<i>Tabla 4-2 Distribución de las Uniones del modelo hidrológico de Guayabo.</i>	<i>4-14</i>
<i>Tabla 4-3 Distribución de los Reach del modelo hidrológico de Cuipilapa.</i>	<i>4-15</i>
<i>Tabla 4-4 Distribución de los tránsitos de avenida del modelo hidrológico de Guayabo.</i>	<i>4-15</i>
<i>Tabla 4-5. Puntos de muestreo de suelo en área de influencia de las cuencas.</i>	<i>4-18</i>
<i>Tabla 4-6 Número de curva para las subcuencas de Cuipilapa.....</i>	<i>4-21</i>
<i>Tabla 4-7 Número de curva para las subcuencas de Guayabo.</i>	<i>4-22</i>
<i>Tabla 4-8 Tiempo de concentración y retardo de las subcuencas de Cuipilapa.</i>	<i>4-23</i>
<i>Tabla 4-9 Tiempo de concentración y retardo de las subcuencas de Guayabo.</i>	<i>4-24</i>
<i>Tabla 4-10 Información de las estaciones meteorológicas de la zona de estudio.....</i>	<i>4-25</i>
<i>Tabla 4-11 Resultados del modelo hidrológico para la zona de Cuipilapa.</i>	<i>4-27</i>
<i>Tabla 4-12 Resultados del modelo hidrológico para la zona de Guayabo.</i>	<i>4-28</i>
<i>Tabla 5-1 Caracterización del modelo bidimensional en Flo2D.....</i>	<i>5-36</i>
<i>Tabla 5-2 Valores de N de Manning para las diferentes coberturas de suelo.</i>	<i>5-38</i>
<i>Tabla 5-3 Área de afectación por escenario estudiado para la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas. ..</i>	<i>5-66</i>
<i>Tabla 5-4 Área de afectación por índice de amenaza para la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas.....</i>	<i>5-67</i>
<i>Tabla 5-5 Estadísticas de los modelos para profundidad de inundación en la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas.....</i>	<i>5-68</i>
<i>Tabla 5-6 Área de afectación por escenario estudiado para la zona de Cuipilapa.</i>	<i>5-68</i>



LISTA DE APÉNDICES

<i>Apéndice A: Anotaciones de campo del GPS.</i>	<i>9-2</i>
<i>Apéndice B: Descripción visual de las estructuras hidráulicas de la zona.</i>	<i>9-8</i>
<i>Apéndice C: Estructuras hidráulicas en formato dwg.</i>	<i>9-19</i>
<i>Apéndice D: Resumen de análisis Hidráulico para Guayabo y Quebrada Hornillas.</i>	<i>9-23</i>
<i>Apéndice E: Ubicación de los perfiles de continuidad para cada modelo.</i>	<i>9-26</i>
<i>Apéndice F: Perfiles de continuidad para cada modelo.</i>	<i>9-29</i>
<i>Apéndice G: Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Cuipilapa para distintos escenarios </i>	<i>9-38</i>
<i>Apéndice H: Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Guayabo para distintos escenarios. </i>	<i>9-63</i>

1 Resumen Ejecutivo

El Proyecto 340-B7-522: Estudio de zonas de amenazas por inundación usando sensores remotos, análisis hidrológico e hidráulico para mejorar la cuantificación y gestión del riesgo, provee a la Comisión Nacional de Emergencias una actualización de los mapas de inundación oficiales en diferentes zonas del país, según disponibilidad de información detallada del terreno. Este proyecto se realiza bajo la coordinación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica (UCR), la cuál es la encargada de gestionar y desarrollar los estudios de los mapas de amenaza por inundación.

El presente informe presenta la elaboración de la modelación hidrológica e hidráulica para el evento del huracán Otto del río Guayabo y el río Cuipilapa, así como la quebrada Hornillas localizados en Bagaces, Guanacaste para determinar las zonas de amenaza a eventos meteorológicos. Las zonas circundantes a estos ríos se vieron altamente afectadas por inundaciones, pérdida de puentes y vidas humanas registradas especialmente en la zona de la Quebrada Hornillas, cercana al Centro Turístico de Termomanía.

La Quebrada Hornillas se encuentra en las cercanías del pueblo de Guayabo en una zona turística, conocida por sus aguas termales. La Quebrada Hornillas y el Río Guayabo se conectan aguas abajo de Guayabo, antes del poblado de la Fortuna, sitio de intersección donde llega el alcance del modelo. En el caso del Río Cuipilapa se encuentra en las cercanías del poblado del mismo nombre.

Este informe incluye las características de las cuencas hidrográficas de los ríos mencionados, la elaboración de mapas con respecto al relieve, suelos, uso de suelo e hidrografía. Caracterización de los parámetros hidrológicos de las cuencas y análisis hidrológico donde se calculan los caudales de escorrentía en las subcuencas desarrolladas para diferentes periodos de retorno. Se realizó una gira de campo en el mes de setiembre del 2020 para establecer las condiciones de los ríos y de la infraestructura hidráulica. Se elaboró una modelación hidráulica bidimensional con el software FLO2D para cuantificar las planicies y mapas de amenaza de inundación para diferentes periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 50 y 100 años tanto para agua limpia como para un flujo de lodos o detritos.

2 Introducción

2.1 Propósito del estudio

El propósito de este estudio es evaluar las condiciones hidrológicas e hidráulicas del lugar para desarrollar mapas de amenaza de inundación para diferentes periodos de retorno con modelación bidimensional de los ríos Guayabo, Cuipilapa y la quebrada Hornillas, ubicados en el cantón de Bagaces, Guanacaste. Esto como apoyo a la actualización de los mapas de inundación de la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) en respuesta a los últimos eventos extremos y a la necesidad de mejorar las condiciones de la evaluación del riesgo en las comunidades aledañas.

2.2 Alcance del trabajo

Este trabajo tiene como alcance la actualización de los mapas de inundación oficiales de la CNE con la incorporación de cartografía actualizada, modelación hidrológica e hidráulica bidimensional de eventos climáticos en las zonas de estudio. Estos mapas son necesarios para gestionar de manera adecuada, preventiva y sobre todo predictiva la amenaza de inundación ante posibles escenarios de intensidades de lluvia en una zona de alta vulnerabilidad. Estas zonas fueron devastadas con anterioridad por eventos extremos como es el caso del más reciente Huracán Otto en noviembre del 2016.

3 Descripción del área de estudio

3.1 Localización

La zona de estudio se encuentra en la región Pacífico Norte de Costa Rica, corresponde al área de influencia de los ríos Guayabo, Cuiupilapa y Quebrada Hornillas, ubicada en la cuenca hidrográfica de Bebedero, perteneciente al cantón de Bagaces que posee un área de 1276.83 Km². (Ver Figura 3-1)

Según datos del INEC para el censo del 2011, el cantón de Bagaces se compone de 4 distritos: Bagaces con una población de 12,367 habitantes, Mogote con 3,398 habitantes, La Fortuna con 2,756 habitantes y Río Naranjo con 1,015 habitantes. El distrito de Mogote es el que cuenta con una densidad de población mayor con un 18.4%, seguido de La Fortuna. Ambos distritos están incluidos en la modelación hidrología e hidráulica y son considerados de alta relevancia.

La zona de estudio se caracteriza por presentar una topografía variable, desde las zonas altas las cuales se encuentran en las faldas del volcán Miravalles, hasta aquellas áreas llanas en las cuales la mayoría de los asentamientos se encuentran ubicados, tal es el caso del poblado de Guayabo. Estos poblados, al estar en una zona tan plana, durante eventos extremos son propensos a inundaciones. Uno de los más recientes corresponde al huracán Otto, en el 2016, el cual ha sido uno de los eventos de mayor impacto en la zona, que dejó pérdidas considerables tanto económicas como humanas. Además, debido a este evento, los cauces de los ríos se han visto modificados.

Para conocer las condiciones en las que se encuentra la zona de estudio, en el mes de septiembre del 2020 se realizó una gira de reconocimiento a la zona. Con ella se observó que el terreno de las zonas bajas del distrito de Mogote corresponde en su mayoría a pastizales y zonas de producción agrícola de subsistencia y ganadería.

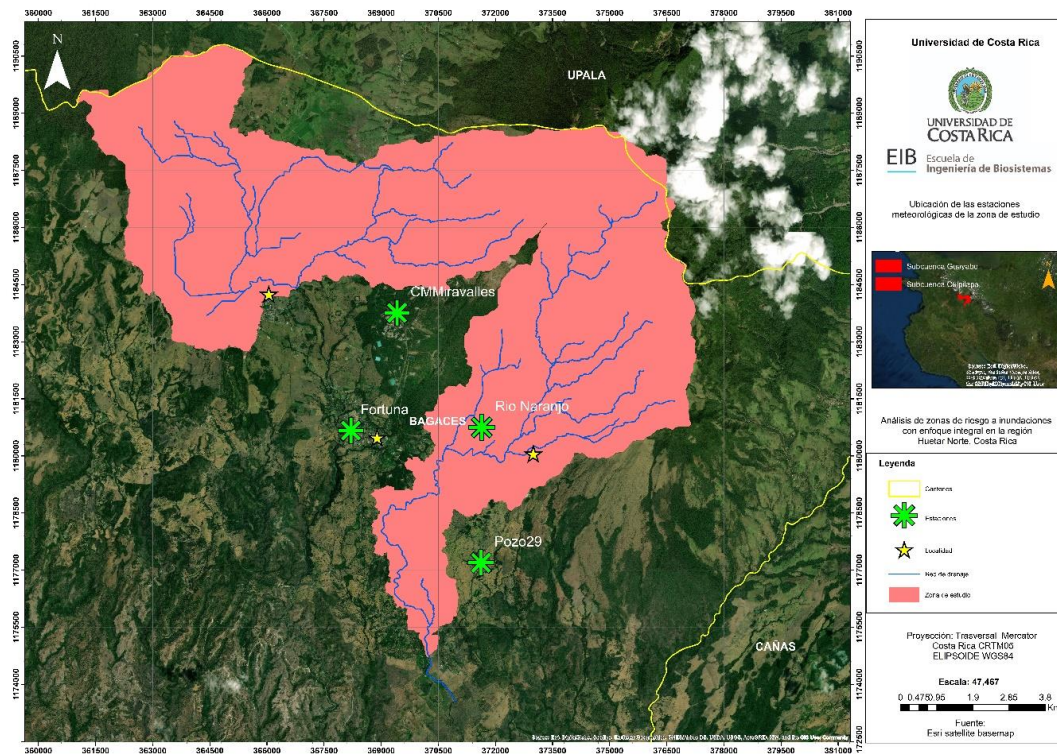


Figura 3-1 Mapa de localización de la Cuenca de Guayabo y Cuipilapa.

3.2 Características morfométricas de las subcuencas y red de drenaje

3.2.1 Delimitación del área de estudio

Para la delimitación del área de estudio, se utilizó información de modelos de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés), con una resolución espacial de 1 m por 1 m generados por la empresa Geospatial Innovations S.A. (GEOINN). Este DEM fue generado con ortofotogrametría de imágenes satelitales de DigitalGlobe de 3 cm de resolución, tomadas en febrero del 2017, 4 meses después del evento de Otto (11/2016). Las imágenes, los modelos de elevación digital y las curvas de nivel fueron provistos a este proyecto por la CNE como insumo base para la elaboración de los mapas de amenaza de inundación.

Con la información topográfica se realizó un mosaico de la zona, abarcando un área total de 343.949 km², contemplando las áreas de interés que corresponden a las zonas de afectación por inundación de los ríos Guayabo, Cuipilapa y Quebrada Hornillas. Dentro de estas zonas se encuentran los poblados principales de Guayabo y Cuipilapa.

Posteriormente a la generación del mosaico, se delimitó las subcuencas mediante el uso de las herramientas ArcHydro Tools y ArcGIS 10.8. La zona de estudio se dividió en dos áreas de aporte o cuencas importantes con aporte a la población de Bagaces: Guayabo

con una subdivisión de 21 subcuencas (Figura 3-3), la cual incluye en su modelo la Quebrada Hornillas y el modelo de Cuipilapa con 8 subcuencas (Figura 3-4).

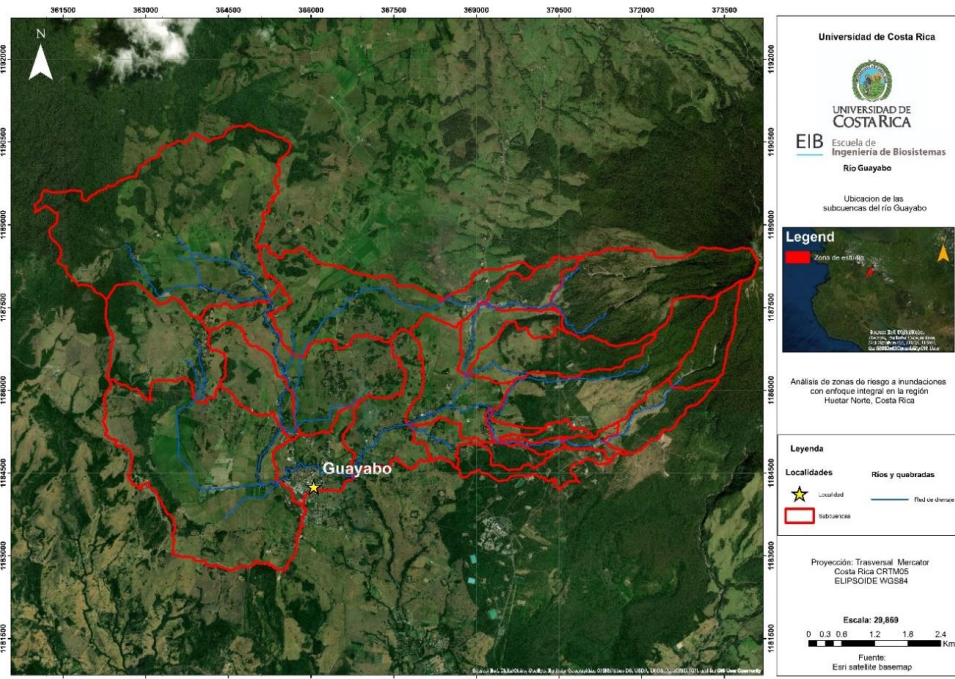


Figura 3-2. Subcuencas para el Río Guayabo y Quebrada Hornillas.

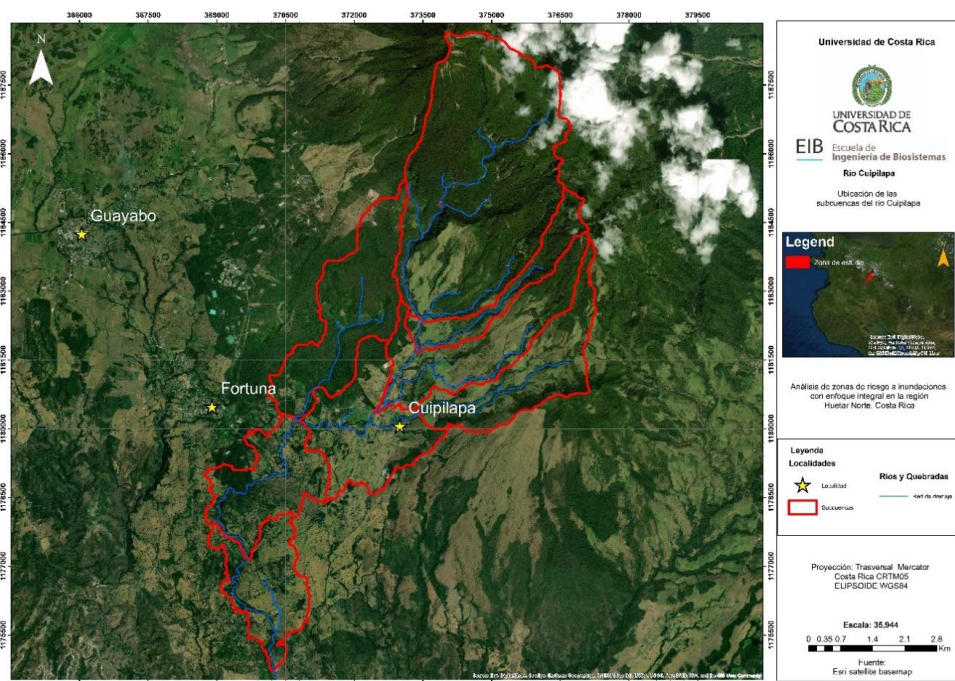


Figura 3-3. Subcuencas para el Río Cuipilapa.

3.2.2 Red Hidrográfica

El sistema fluvial del cantón Bagaces, corresponde a la vertiente del Pacífico, y los ríos analizados contribuyen a la cuenca del río Bebedero. El río Bebedero se origina en la confluencia del sistema de los ríos Tenorio y Guayabo. Al primer efluente se le unen los ríos Chiquito, Naranjo y Cuipilapa con su afluente Peje; el segundo recibe a los ríos Agua Caliente y Piedras, este último nace en la unión de los ríos Enmedio y Potrero, y se le une también el río San Jerónimo, que se origina de la confluencia de los ríos Montano y Montenegro (IFAM, 2020). En la Figura 3-2; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 3-3 se presentan las subcuencas y los respectivos cauces que definen tal división.

Se establecen parámetros para la clasificación de las cuencas y sus respectivos cauces, los cuales son mencionados a continuación. La **longitud del cauce principal** (L_r) es la longitud total en kilómetros de la corriente principal de la cuenca, la cual es la que pasa por su punto de salida.

La **pendiente media del río** (I_r) se define como la diferencia entre la elevación máxima del río (H_M) y la mínima (H_m) dividida entre la longitud del río en kilómetros (L_r : longitud del cauce principal):

$$I_r = \frac{H_M - H_m}{1000 * L_r} \quad (4)$$

Donde H_M hace referencia a la cota máxima de elevación y H_m para menor elevación del cauce principal. A continuación, se presenta la longitud del cauce principal y la pendiente promedio. En la Figura 3-4 se encuentran los modelos de elevación digital de las dos zonas de estudio.

Tabla 3-1 Parámetros de longitud y pendiente promedio para cauces principales

Parámetro		Guayabo	Cuipilapa
Área de drenaje	km ²	52.84	49.76
Perímetro de la cuenca	km	54.43	59.49
Longitud total de los cauces de agua	km	53.02	54.72
Longitud del cauce principal	km	1.76	22.01
Longitud al centroide	km	5.11	14.54
Elevación promedio de la cuenca	msnm	682.82	682.82
Elevación media de la cuenca	msnm	581	743
Elevación máxima de la cuenca	msnm	1987	2031
Elevación mínima de la cuenca	msnm	525	255
Índice de pendiente	Ip	0.16	0.23
- Pendiente media	m/m	0.01	0.06
- Pendiente media ponderada	m/m	0.01	0.03

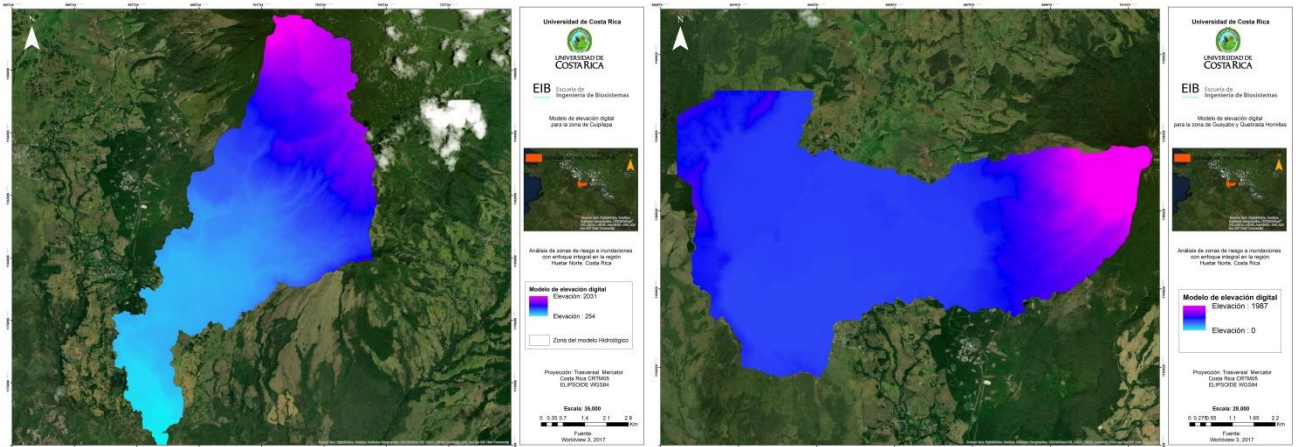


Figura 3-4. Modelos de elevación digital para Cuipilapa (izquierda) y Guayabo (derecha).

Observando los resultados de la Tabla 3-1 se puede determinar que ambas cuencas de estudio son muy parecidas. En el caso de Cuipilapa se tiene una mayor longitud del cauce principal, ya que este río se ubica a lo largo de toda la subcuenca.

La **densidad de drenaje** (D_d) se define como la longitud total de cauces dentro de la cuenca (L_s) entre el área (A) total de drenaje:

$$D_d = \frac{\sum L_s}{A} \quad (5)$$

Se calculó la densidad de drenaje para las subcuenclas, las cuales son presentadas en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Densidad de drenaje para las subcuenclas

Sistemas de drenaje	Guayabo	Cuipilapa
- Número de orden	3	3
- Densidad de drenaje	1.00 km/km ²	1.10

Si la densidad de drenaje es baja es de esperarse que la cuenca sea pobremente drenada, ya que hay pocos ríos en comparación con el área de la cuenca; por el contrario, para una densidad de drenaje alta se puede deducir que existe un mayor drenaje de la cuenca debido a la cantidad de afluentes que se presentan, esto es un indicador de una posible respuesta rápida ante una tormenta.

Los factores que controlan la densidad de drenaje son: la litología de la región, la facilidad de infiltración del agua de lluvia bajo la superficie del terreno y la presencia o ausencia de cobertura vegetal entre otros.

3.2.3 Parámetros de forma de las subcuencas

El *factor de forma* relaciona los dos parámetros anteriores para definir la forma de la cuenca y su susceptibilidad a inundaciones. Siendo valores menores de 1 con baja susceptibilidad a inundaciones y valores iguales o mayores a uno con tendencia a ocurrencia de avenidas mayores. Y se calcula como:

$$F = \frac{A}{P} \quad (6)$$

La clasificación del índice de forma se basa según lo presentado en la siguiente tabla.

Tabla 3-3. Valores de interpretación de índice de forma.

Valores aproximados	Forma de la cuenca
> 0.22	Muy alargada
0.22 - 0.30	Alargada
0.30 - 0.37	Ligeramente alargada
0.37 - 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 - 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 - 0.80	Ensanchada
0.80 - 1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodeada de desagüe

Fuente: (Pérez, 1979)¹

Para ambas subcuencas tenemos un índice de forma muy ensanchado como se ve en la Tabla 3-3.

El *índice de compacidad* (I_c), parámetro que relaciona el efecto de la forma de la cuenca con el patrón de la escorrentía. Se define como el cociente adimensional del perímetro de la cuenca (P) y el perímetro de un círculo (P_c) que tenga una superficie igual a la de la cuenca:

$$I_c = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (7)$$

El valor que toma esta expresión es siempre mayor que la unidad y crece con la irregularidad de la forma de la cuenca y está ligado al tiempo de concentración de la cuenca, para este índice se establece la siguiente clasificación:

¹ Pérez J. 1979. Fundamentos del ciclo hidrológico. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas-Venezuela. 1-38.

- a) $1 < I_c < 1,25$; la forma de la cuenca es ovalada.
- b) $1,25 < I_c < 1,50$; la forma de la cuenca es oblonga.
- c) $1,50 < I_c < 1,75$; la forma de la cuenca es alargada.
- d) $I_c > 1,75$; la forma de la cuenca es rectangular o rectangular alargada.

Cuando el índice de compacidad es igual a 1 la cuenca tiene forma circular y posee la mayor área posible para su perímetro. Esta forma hace más probable que una tormenta cubra toda la cuenca y que esté contribuyendo más volumen al punto de salida. Esto trae consigo caudales picos más altos que suelen reflejarse en problemas de inundación en las partes bajas de la cuenca. Adicionalmente conforme el índice de compacidad es mayor los cauces tienden a ser más largos y la cuenca responde de forma más lenta ante una precipitación, disminuyendo los caudales pico (Ver Tabla 3-4).

Tabla 3-4 Parámetros de forma de las subcuencas.

Forma de la cuenca		Guayabo	Cuipilapa
- Índice de compacidad		2.11	2.38
- Factor de forma		0.97	0.84
Rectángulo equivalente			
- Lado mayor	km	25.333	28.20
- Lado menor	km	2.09	1.76

3.2.4 Parámetros de relieve de las subcuencas

En la Figura 3-5 y Figura 3-6 se pueden observar las pendientes para cada una de las subcuencas. En el caso de Cuipilapa se tiene pendientes más fuertes en la zona alta, donde el cauce del río maneja velocidades más altas que en la zona baja. En el caso de Guayabo las pendientes fuertes se encuentran por las zonas altas de Quebrada Hornillas, la mayoría de la zona de estudio presenta pendientes leves, lo cual favorece velocidades del flujo de agua más bajas.

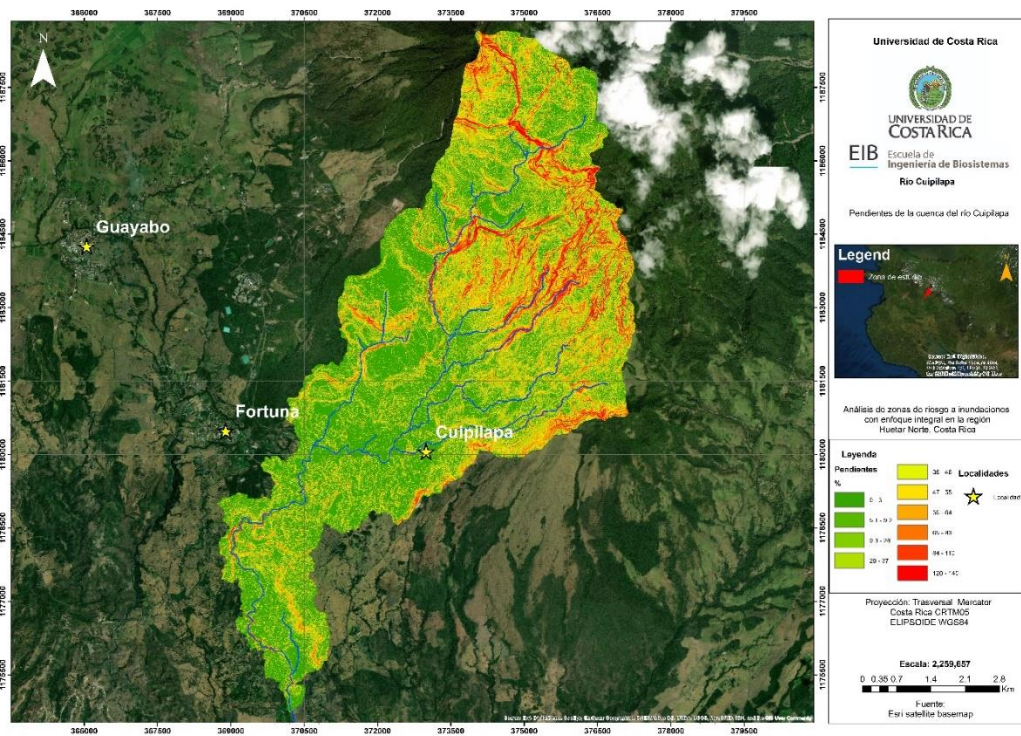


Figura 3-5. Pendientes en la subcuenca de Cuipilapa.

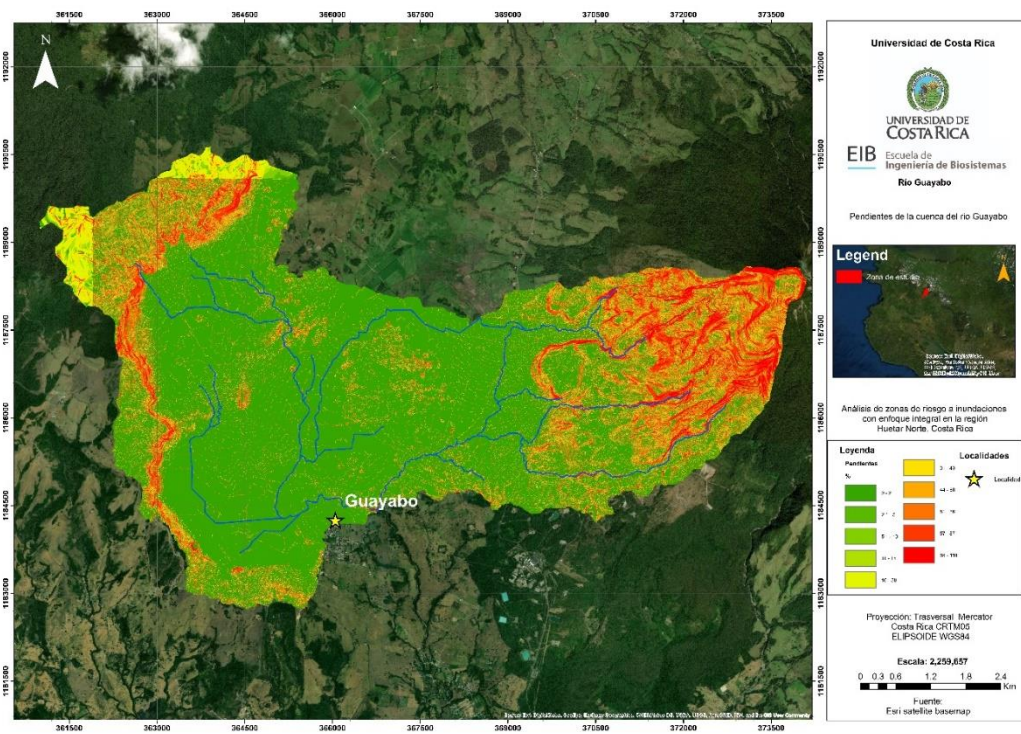


Figura 3-6 Pendientes en la subcuenca de Guayabo.

La **curva hipsométrica** es la relación entre la altitud y la superficie de la cuenca que se encuentra a mayor altura. Se define en función del área acumulada sobre una determinada altura. A partir de la curva hipsométrica se puede determinar la **elevación media** de la cuenca, la cual equivale a la elevación correspondiente al 50% del área de la cuenca. En la Figura 3-7 y Figura 3-8 se puede observar las curvas para cada subcuenca.

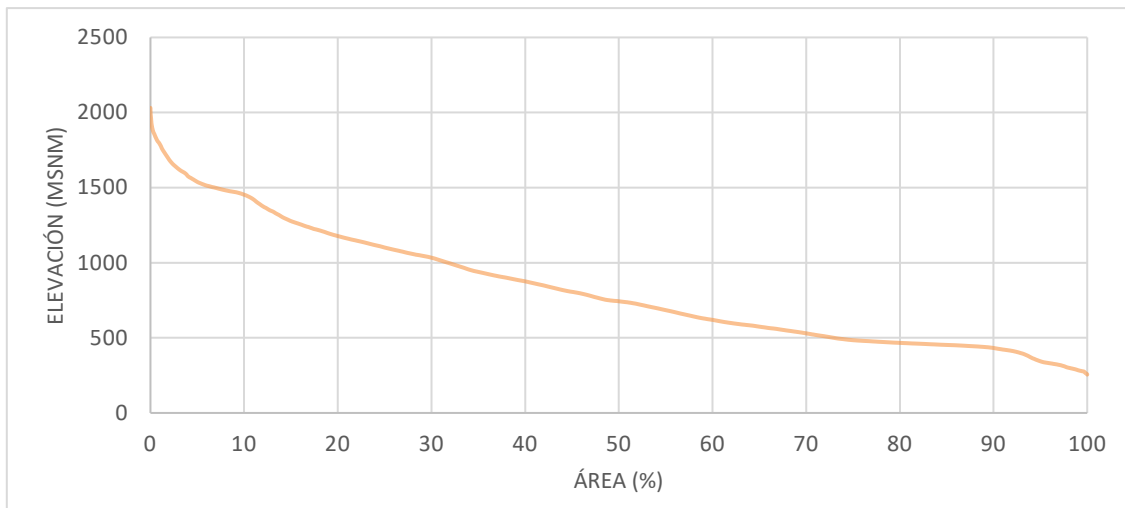


Figura 3-7 Curva Hipsométrica para Cuipilapa.

En el caso de la subcuenca de Cuipilapa se tiene un comportamiento en equilibrio reflejado en la curva, ya que no muestra una pendiente muy fuerte al inicio de esta. Para la subcuenca de Guayabo se tiene un comportamiento de cuenca sedimentaria, donde la curva tiene una pendiente fuerte en un inicio, hasta estabilizarse hasta cierto punto.

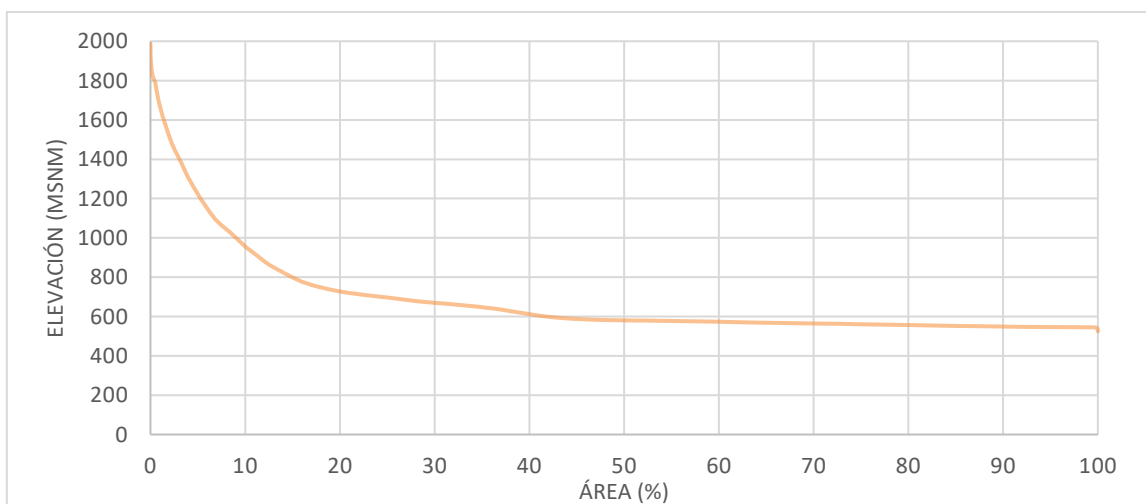


Figura 3-8 Curva Hipsométrica para Guayabo.

El *índice de pendiente* (I_p), es una ponderación que se establece entre las pendientes y el tramo recorrido por el río. Además, expresa en cierto modo, el relieve de la cuenca. Se obtiene utilizando el rectángulo equivalente:

$$I_p = \sum \sqrt{\beta_i}(\alpha_i - \alpha_{i-1}) * \frac{1}{\sqrt{L}} \quad (8)$$

Dónde:

L = longitud del lado mayor del rectángulo equivalente (km)

n = número de curvas de nivel existente en el rectángulo equivalente, incluido los extremos.

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ = cotas de las n curvas de nivel consideradas (km)

β_i = fracción de la superficie total de la cuenca comprendida entre las cotas n y $n-1$ de curvas de nivel.

$$\beta_i = \frac{A_i}{A_T} \quad (9)$$

Dónde:

A_i = área i entre cotas de curvas de nivel

A_T = área total de la cuenca

El índice de pendiente para ambas subcuencas, se puede ver en la Tabla 3-1.

4 Análisis Hidrológico

Para la modelación hidrológica de las subcuencas de la zona de Guayabo y Cuipilapa, se utilizó el programa HEC-HMS v.4.6.1. donde en conjunto con la capa de ríos y las subcuencas correspondientes a cada zona, se definieron los parámetros para las subcuencas, uniones, tránsito de avenidas, además de los tiempos de concentración para cada subcuenca, necesarios para la elaboración de dicho modelo.

Con respecto a las subcuencas de cada modelo, se ubicaron los centroides de cada subcuenca de manera que se tienen un total de 8 subcuencas, 6 uniones “junction” y 5 tránsitos de avenidas “reach”, para la subcuenca de Cuipilapa. En el caso de Guayabo se tienen 22 subcuencas, 16 uniones y 15 tránsitos de avenida. En la Figura 4-1 se pueden observar ambos modelos.

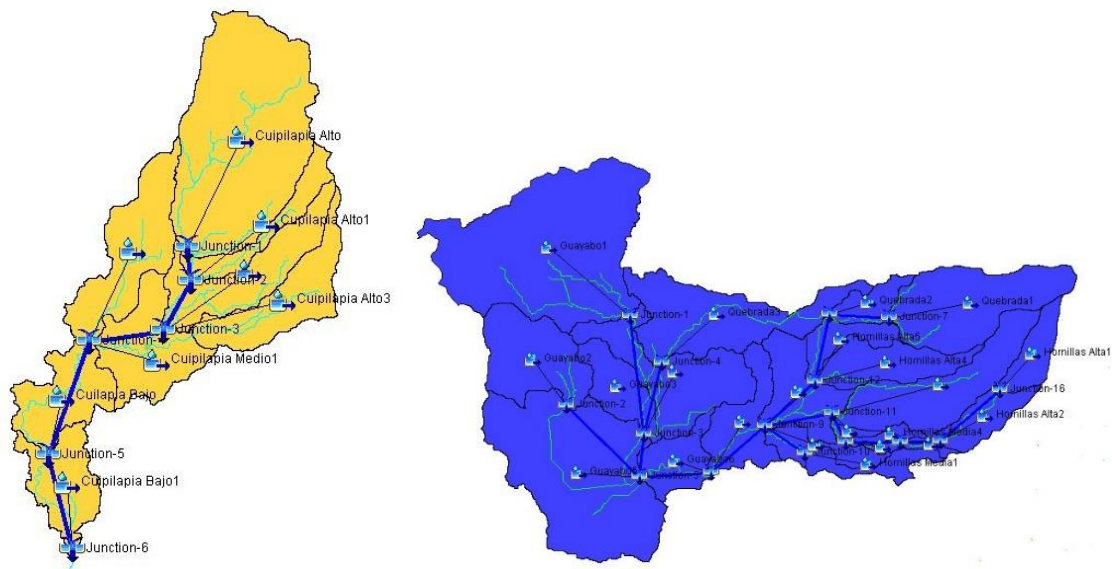


Figura 4-1 Configuración de los modelos hidrológicos en HEC-HMS. A) Modelo Cuipilapa, B) Modelo Guayabo

Lo primero que se realiza en la configuración hidrológica, es colocar las subcuencas, estos se conectan a las uniones o “junctions”, los cuales se alimentan también de los tránsitos de avenidas o “reach”. Todos estos elementos descargan desde aguas arriba, desembocando a un único tránsito de avenidas de salida, que se encuentra aguas abajo ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Tabla 4-2.

Tabla 4-1 Distribución de las Uniones o “Junction” del modelo hidrológico de Cuipilapa

Unión “Junction”	Alimentación	Descarga
1	Cuipilapa Alto	Reach1
2	Cuipilapa Alto1, Reach1	Reach2
3	Cuipilapa Alto2, Cuipilapa Alto3, Reach2	Reach3
4	Cuipilapa Medio, Cuipilapa Medio1, Reach3	Reach4
5	Cuipilapa Bajo, Reach4	Reach5
6	Cuipilapa Bajo1, Reach5	Salida

Tabla 4-2 Distribución de las Uniones del modelo hidrológico de Guayabo.

Unión “Junction”	Alimentación	Descarga
1	Guayabo1	Reach2
2	Guayabo2	Reach1
3	Guayabo4, Reach2, Reach3	Reach4
4	Quebrada3	Reach3
5	Guayabo5, Reach1	Reach5
6	Quebrada2, Reach6	Reach7
7	Quebrada1	Reach6
8	Guayabo6, Hornillas, Reach5, Reach8	Salida
9	Hornillas Media5, Hornillas Media2, Reach9, Reach10, Reach11	Reach8
10	Hornillas Media1	Reach11
11	Hornillas Alta3, Hornillas Media6, Reach12	Reach10
12	Hornillas Alta5, Reach7	Reach9
13	Hornillas Media3, Hornillas Media4, Reach13	Reach12
14	Hornillas Alta6, Reach14	Reach13
15	Hornillas Alta2, Reach15	Reach14
16	Hornillas Alta1	Reach15

En el caso de los tránsitos de avenida o “reach”, estos pasan por algunas subcuencas del modelo, las cuales tienen una unión de conexión aguas arriba y aguas abajo, permitiendo trasladar el flujo de agua a lo largo de la subcuenca. (Ver Tabla 4-3 y Tabla 4-4).

Tabla 4-3 Distribución de los Reach del modelo hidrológico de Cuipilapa.

Reach	Subcuenca	Unión Aguas Arriba	Unión Aguas Abajo
1	Cuipilapa Alto1	Junction1	Junction2
2	Cuipilapa Alto2	Junction2	Junction3
3	Cuipilapa Medio1	Junction3	Junction4
4	Cuipilapa Bajo	Junction4	Junction5
5	Cuipilapa Bajo	Junction5	Junction6

Tabla 4-4 Distribución de los tránsitos de avenida del modelo hidrológico de Guayabo.

Tránsito “Reach”	Subcuenca	Unión Aguas Arriba	Unión Aguas Abajo
1	Guayabo5	Junction2	Junction5
2	Guayabo4	Junction1	Junction3
3	Guayabo4	Junction4	Junction3
4	Guayabo5	Junction3	Junction5
5	Guayabo6	Junction8	Junction5
6	Quebrada2	Junction7	Junction6
7	Hornillas Alta5	Junction6	Junction12
8	Hornillas Baja	Junction9	Junction8
9	Hornillas Media4	Junction12	Junction9
10	Hornillas Media5	Junction11	Junction9
11	Hornillas Media2	Junction10	Junction9
12	Hornillas Media6	Junction13	Junction11
13	Hornillas Media3	Junction14	Junction13
14	Hornillas Alta6	Junction15	Junction14
15	Hornillas Alta2	Junction16	Junction15

4.1 Cobertura del terreno

Al tener un conocimiento sobre las características de los suelos su capacidad de retención e infiltración, se puede promover el uso sostenible del terreno propiciando un desarrollo armónico con la naturaleza mitigando los daños debido al aumento de la escorrentía por actividades humanas. Por lo tanto, es importante caracterizar la condición actual de la zona para determinar si de acuerdo con los valores de capacidad del terreno existe un sobreuso del sitio. Para esto se debe de determinar la cobertura del suelo, donde gran parte la actividad agrícola y ganadera es fundamental para el sustento y progreso de la zona y del país en general. La determinación del uso del suelo es de suma importancia en la gestión del recurso hídrico para su conservación y aprovechamiento sostenible.

Para realizar el mapa de cobertura, se procesaron imágenes satelitales de LandSat 8 de la provincia de Guanacaste con una resolución espacial de 30 metros por 30 metros y una resolución temporal de 16 días. La imagen fue analizada y procesada según se menciona en Rojas González, A.M. (2017) donde se registraron 14 clases de cobertura, las cuales fueron recortadas para la zona de estudio. En la Figura 4-2 y Figura 4-3 se puede observar el resultado para Cuipilapa y Guayabo.

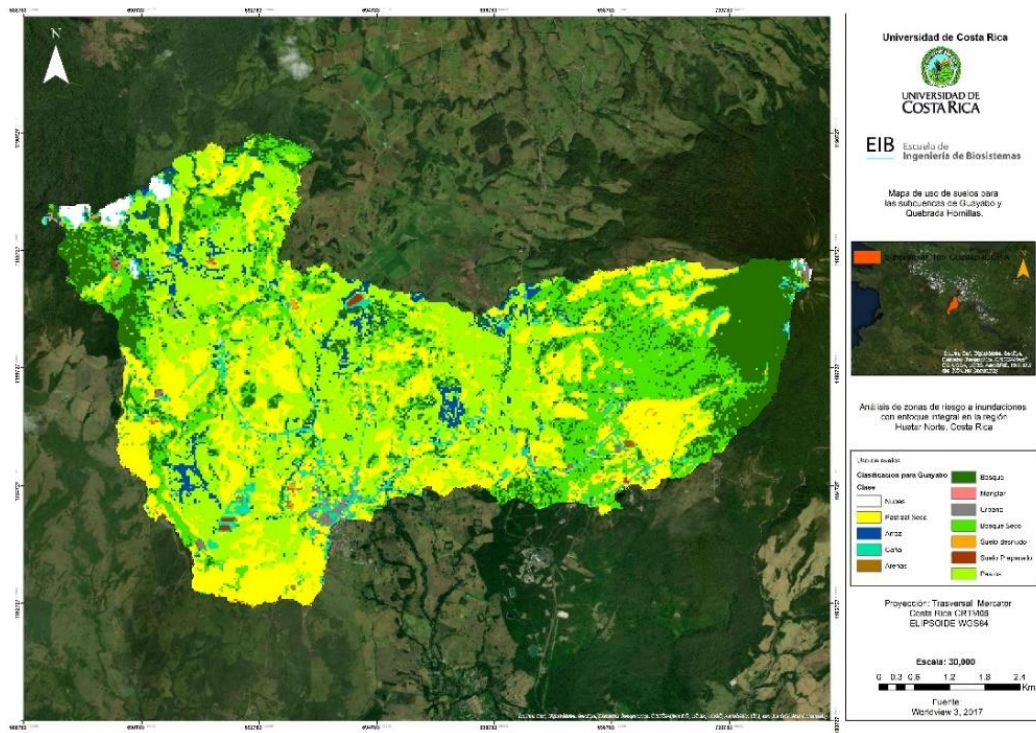


Figura 4-2 Cobertura para la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas con su respectiva clasificación.

estas y con influencia en ellas. Tales puntos se utilizaron para la descripción de características morfológicas del suelo como textura, condiciones de drenaje, profundidad efectiva entre otros. Ver la siguiente tabla.

Tabla 4-5. Puntos de muestreo de suelo en área de influencia de las cuencas.

Punto	Coordenadas		Cantón	Horizonte	Clase Textural	Profundidad del perfil
	X	Y				
1	-85.26938	10.65308	Bagaces	1	ARCILLOSO	32
1	-85.26938	10.65308	Bagaces	2	ARCILLOSO	33
1	-85.26938	10.65308	Bagaces	3	ARCILLOSO	40
1	-85.26938	10.65308	Bagaces	4	ARCILLOSO	25
2	-85.36297	10.55417	Bagaces	1	FRANCO ARCILLOSO	25
2	-85.36297	10.55417	Bagaces	4	FRANCO LIMOSO	25
2	-85.36297	10.55417	Bagaces	5	FRANCO ARCILLOSO	10
2	-85.36297	10.55417	Bagaces	6	FRANCO ARCILLOSO	30
2	-85.36297	10.55417	Bagaces	7	FRANCO ARCILLOSO	30
2	-85.36297	10.55417	Bagaces	8	FRANCO ARENOSO	70
3	-85.36572	10.55421	Bagaces	1	FRANCO	50
3	-85.36572	10.55421	Bagaces	2	FRANCO ARENOSO	30
3	-85.36572	10.55421	Bagaces	3	ARENA FRANCA	20
3	-85.36572	10.55421	Bagaces	4	ARENA FRANCA	40
3	-85.36572	10.55421	Bagaces	5	FRANCO ARENOSO	60
4	-85.35872	10.55514	Bagaces	1	FRANCO	20
4	-85.35872	10.55514	Bagaces	2	FRANCO	33
4	-85.35872	10.55514	Bagaces	3	FRANCO ARENOSO	56
4	-85.35872	10.55514	Bagaces	4	FRANCO	74
4	-85.35872	10.55514	Bagaces	5	ARENA FRANCA	0
5	-85.27424	10.53080	Bagaces	1	FRANCO	22
5	-85.27424	10.53080	Bagaces	2		0
6	-85.27323	10.53030	Bagaces	1	FRANCO ARCILLOSO	10
6	-85.27323	10.53030	Bagaces	2	ARCILLOSO	41
6	-85.27323	10.53030	Bagaces	3	ARCILLOSO	75
6	-85.27323	10.53030	Bagaces	4		0
7	-85.24734	10.53838	Bagaces	1	FRANCO	8
7	-85.24734	10.53838	Bagaces	2	FRANCO ARCILLO ARENOSO	24
7	-85.24734	10.53838	Bagaces	3	ARCILLO ARENOSO	36
7	-85.24734	10.53838	Bagaces	4		0
8	-85.24142	10.72138	Bagaces	1	ARCILLOSO	43
8	-85.24142	10.72138	Bagaces	2	ARCILLOSO	
9	-85.08050	10.69700	Bagaces	1	FRANCO ARCILLOSO	11

9	-85.08050	10.69700	Bagaces	2	FRANCO ARCILLOSO	31
9	-85.08050	10.69700	Bagaces	3	ARCILLOSO	70
9	-85.08050	10.69700	Bagaces	4	FRANCO ARCILLOSO	98
9	-85.08050	10.69700	Bagaces	5	ARCILLOSO	120+
10	-85.20089	10.67252	Bagaces	1	FRANCO ARCILLOSO	10
10	-85.20089	10.67252	Bagaces	2	ARCILLOSO	22
10	-85.20089	10.67252	Bagaces	3	ARCILLOSO	38
10	-85.20089	10.67252	Bagaces	4	ARCILLOSO	88
10	-85.20089	10.67252	Bagaces	5	ARCILLOSO	
11	-85.24474	10.52109	Bagaces	1	ARCILLOSO	5
11	-85.24474	10.52109	Bagaces	2	ARCILLOSO	25
11	-85.24474	10.52109	Bagaces	3	ARCILLOSO	20
11	-85.24474	10.52109	Bagaces	4	ARCILLOSO	35
12	-85.22311	10.47630	Bagaces	1	FRANCO ARCILLO LIMOSO	13
12	-85.22311	10.47630	Bagaces	2	ARCILLOSO	13

La condición hidrológica del suelo se estableció con relación a la textura del suelo y la profundidad de este, definiendo condición hidrológica B para suelos de textura franca y franco-arcillo-arenoso. La condición C corresponde a suelos franco-arcillosos mientras que los suelos de textura fina como los arcillosos se les asignaron la condición D.

Ante la importancia de los suelos en el ciclo del agua, la profundidad de los suelos es un parámetro importante para estimar la capacidad de almacenaje de agua del terreno y su retención de humedad.

Adicionalmente, el MAG clasifica las profundidades dentro de las siguientes categorías:

1. **Muy profundo:** más de 120 cm.
2. **Profundo:** 90 cm – 120 cm.
3. **Moderadamente profundo:** 60 cm – 90 cm.
4. **Poco profundo:** 30 cm – 60 cm.
5. **Superficial:** menos de 30 cm.

Considerando la clasificación anterior y sumando las profundidades de los perfiles para los puntos de medición, para la zona de Bagaces en su mayoría se tiene profundidades muy profundas para ambos modelos con un total del 50% de los puntos. Sin embargo, en algunas zonas se cuenta con profundidades poco profundas a superficial (25%).

4.3 Número de curva

El balance hidrológico en el sistema suelo-cobertura integra los procesos de precipitación, infiltración, evapotranspiración y escorrentía. Conociendo el comportamiento de la precipitación, la variación de la evapotranspiración e infiltración y el efecto regulador del sistema suelo-cobertura, se puede determinar la escorrentía, la cual constituye la información básica para el cálculo de la red de drenaje (Villón Bejár , .2006)³.

Uno de los métodos para el cálculo de la escorrentía superficial es el de número de curva (CN) desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, el cual relaciona la humedad antecedente, el grupo hidrológico y la cobertura del terreno con la escorrentía. Valores de número de curva varían entre CN=30 donde se da la infiltración completa y una mínima escorrentía y un CN= 99 que indica que toda la lluvia se convierte en escorrentía.

La metodología de número de curva integra varios criterios como la condición hidrológica, la cual establece la capacidad de la superficie de la cuenca para favorecer o dificultar el escurrimiento directo y está relacionada a la cobertura vegetal, donde si el 75% del área total de la cuenca pertenece a cobertura vegetal la condición hidrológica se define como buena, la condición regular presenta una cobertura vegetal de entre 50% a 75% del área total de la cuenca, mientras que una cobertura vegetal inferior al 50% es definida como pobre.

Otro criterio es el grupo hidrológico del suelo, el cual se define como Grupo A para suelos con bajo potencial de escorrentía aun estando húmedos y está constituido por suelos arenosos y gravas con drenaje de bueno a excesivo. El Grupo B se refiere a suelos con un moderado bajo potencial de escorrentía cuando están mojados, se constituye de suelos profundos con texturas de moderadamente finas a moderadamente gruesas.

Los suelos que poseen un moderado a alto potencial de escorrentía son suelos saturados, constituidos por texturas de moderadamente finas a finas y con estratos que impiden el movimiento de agua vertical, estas se clasifican en el Grupo C. Mientras que el Grupo D presenta los suelos con un alto poder de escorrentía y bajas tasas de infiltración cuando están saturados, lo constituyen suelos arcillosos con alto nivel de esponjamiento, suelos con capas de arcilla y suelos superficiales sobre material casi impermeable.

³ Villón Bejár, M. (2006). Drenaje. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

La condición de humedad antecedente se ve determinada por la precipitación total durante el período de 5 días anteriores a la tormenta, para ella el Sistema de Conservación de Suelos de la USDA (Villón Bejár, 2006), definió 3 casos:

- CN-I (seca): en estación seca se tiene una precipitación acumulada menor a 13 mm y en estación de crecimiento menor a 35 mm.
- CN-II (media): la precipitación acumulada en estación seca se encuentra entre 13-25 mm y, en la estación de crecimiento, se encuentra entre 35-50 mm.
- CN-III (húmeda): se da un nivel de precipitación acumulada mayor a 25 mm y a 50 mm en las estaciones secas y de crecimiento, respectivamente.

De tal forma que, el número de curva para la CN-II se puede obtener mediante los datos tabulados por la USDA, mientras que, para las condiciones I y III se deben utilizar las siguientes ecuaciones:

$$CN_{(I)} = \frac{4.2CN_{(II)}}{10 - 0.058CN_{(II)}} \quad (12)$$

$$CN_{(III)} = \frac{23CN_{(II)}}{10 + 0.13CN_{(II)}} \quad (13)$$

La cobertura y uso del suelo incluye toda clase de vegetación, los cuerpos de agua y las superficies impermeables presentes. Se calculó el número de curva para cada subcuenca, ver Tabla 4-6 y Tabla 4-7 usando la cobertura y las características de los suelos presentes en la zona.

Tabla 4-6 Número de curva para las subcuencas de Cuipilapa.

Subcuenca	CN II	CN III
Cuipilapa Alto	59.29	77.01
Cuipilapa Alto1	67.99	83.01
Cuipilapa Alto2	71.60	85.29
Cuipilapa Alto3	72.02	85.55
Cuipilapa Bajo	78.84	89.55
Cuipilapa Bajo1	81.67	91.11
Cuipilapa Medio	71.96	85.51
Cuipilapa Medio1	78.32	89.26

El número de curva en promedio es muy parecido para ambas zonas. Este resultado es esperado, ya que ambos modelos se encuentran en zonas muy parecidas y cercanas. Para el cálculo del número de curva de ambas cuencas, se despreciaron las áreas correspondientes a nubes, sombra de nubes y cuerpos de agua para la contabilización del área total.

Tabla 4-7 Número de curva para las subcuencas de Guayabo.

Subcuenca	CN II	CN III
Guayabo1	72.35	85.75
Guayabo2	73.14	86.23
Guayabo3	74.58	87.09
Guayabo4	74.23	86.89
Guayabo5	75.89	87.87
Guayabo6	77.75	88.94
Hornillas Alta1	51.69	71.10
Hornillas Alta2	67.39	82.62
Hornillas Alta3	69.66	84.08
Hornillas Alta4	73.09	86.20
Hornillas Alta5	73.86	86.66
Hornillas Alta6	76.53	88.24
Hornillas Baja	75.53	87.65
Hornillas Media1	73.31	86.33
Hornillas Media2	74.08	86.80
Hornillas Media3	73.81	86.64
Hornillas Media4	75.84	87.83
Hornillas Media5	75.28	87.51
Hornillas Media6	75.24	87.48
Quebrada1	67.66	82.79
Quebrada2	73.16	86.24
Quebrada3	74.14	86.83

4.4 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración de cada subcuenca se obtuvo mediante el método de la Carta de velocidades definido en el Technical Release 55: “Urban Hydrology for Small Watersheds” de la USDA (1986). El cual utiliza la vía del flujo más lejana (“Longest flow path”) que transita por cada subcuenca, para su obtención se utilizó el software ArcGis, con la extensión ArcHydro Tools. La longitud de flujo más largo se categoriza en tres tramos de acuerdo con la bibliografía, los cuales son: flujo laminar en los primeros 900 m (utilizando una intensidad de 90 mm/h para un periodo de retorno de precipitación de 2 años y 24 horas. Segundo, el flujo concentrado, el cual abarca la longitud después de los primeros 90 m hasta

la intersección entre el cauce principal de cada subcuenca con el flujo teórico, y por último está el tramo de flujo en canal. Este último, corresponde a lo que queda del flujo teórico y como su nombre lo indica se analiza el flujo en canal o ríos. Para este estudio se generalizó la sección transversal como trapezoidal en función del espejo de agua promedio medido con las ortofotos aguas arriba, parte media y parte baja del río de cada subcuenca. Además, se asumió una pendiente del talud del canal de 1: 0.5, un tirante promedio de 2 a 3 m de acuerdo con las dimensiones de cada canal, y, por último, se utilizó 0.035 como coeficiente de Manning, el cual corresponde a canales naturales de tierra con algunas malezas y pasto.

Para cada tramo se obtuvieron las longitudes, las elevaciones de cada punto aguas arriba y abajo mediante ArcGIS del modelo de elevación digital. Los tiempos de concentración (T_c) se calculan realizando la sumatoria de los tiempos antes descritos. El tiempo de retardo (T_{lag}) se calcula asumiendo un factor de 0.6 al tiempo de concentración, según se indica en la literatura. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4-8 y Tabla 4-9.

Tabla 4-8 Tiempo de concentración y retardo de las subcuencas de Cuipilapa.

Subcuenca	T_c (min)	T_{lag} (min)
Cuipilapa Alto	45.81	27.49
Cuipilapa Alto1	42.78	25.67
Cuipilapa Alto2	50.14	30.09
Cuipilapa Alto3	49.80	29.88
Cuipilapa Bajo	86.76	52.06
Cuipilapa Bajo1	86.82	52.09
Cuipilapa Medio	84.80	50.88
Cuipilapa Medio1	45.29	27.17

En promedio los tiempos de concentración son mayores en Cuipilapa en comparación de Guayabo, esto se puede deber a que las subcuencas de Cuipilapa son más largas en extensión. Estos valores son importantes para determinar posibles impactos y tiempos de respuesta para una zona en amenaza.

Tabla 4-9 Tiempo de concentración y retardo de las subcuencas de Guayabo.

Subcuenca	T _c (min)	T _{lag} (min)
Guayabo1	66.99	40.19
Guayabo2	62.34	37.40
Guayabo3	93.58	56.15
Guayabo4	103.22	61.93
Guayabo5	82.20	49.32
Guayabo6	32.74	19.64
Hornillas Alta1	26.05	15.63
Hornillas Alta2	37.46	22.48
Hornillas Alta3	35.58	21.35
Hornillas Alta4	42.38	25.43
Hornillas Alta5	50.59	30.35
Hornillas Alta6	38.85	23.31
Hornillas Baja	136.83	82.10
Hornillas Media1	39.09	23.46
Hornillas Media2	51.56	30.93
Hornillas Media3	28.10	16.86
Hornillas Media4	54.29	32.58
HornillasMedia5	72.60	43.56
HornillasMedia6	15.54	9.32
Quebrada1	43.64	26.18
Quebrada2	29.77	17.86
Quebrada3	46.67	28.00

4.5 Datos de Precipitación y tormenta de diseño

4.5.1 Caracterización del Huracán Otto y análisis de precipitación

El huracán Otto, impactó la zona norte de Costa Rica del 23 al 26 de noviembre del 2016 como un huracán categoría III y su salida del país como tormenta tropical dado el debilitamiento que experimentó por un sistema de baja presión y su paso por territorio nacional. La cantidad de precipitación ocasionó gran impacto en las zonas de Bagaces, Guayabo, Cuiquilapa así como en Upala y Bijagua. Tuvo efectos considerables en la flora y fauna, poblaciones y zonas de cultivos dados los importantes deslizamientos y desbordamiento de los ríos. Se registraron precipitaciones de hasta 298.97 mm en un lapso de 24 horas, lo que generó inundaciones y deslizamientos en las zonas afectadas. El 24 de noviembre, Otto, alcanzó una velocidad de vientos de 175 km/h y una velocidad de desplazamiento de 15 km/h. (Instituto Meteorológico Nacional, 2017)

Para la Cuenca del Río Guayabo y Cuipilapa se cuentan con las estaciones meteorológicas de ICE con influencia directa en la zona de estudio, las cuales son Casa de Máquinas Miravalles (76044), Pozo 29 (76050), Río Naranjo (76029) y Fortuna (76034), Figura 3-1 y Tabla 4-10.

Tabla 4-10 Información de las estaciones meteorológicas de la zona de estudio.

Número	Nombre de la estación	Cuenca	Norte	Este	Elevación (m.s.n.m.)	Sistema de coordenadas
76029	Río Naranjo	Bebedero	1180397	371679	466	CRTM-05
76034	Fortuna	Bebedero	1180311	368245	433	CRTM-05
76036	Cuipilapa	Bebedero	1180194	372985	492	CRTM-05
76044	Casa Máquinas Miravalles	Bebedero	1183404	369456	629	CRTM-05
76050	Pozo 29	Bebedero	1180396	371673	493	CRTM-06

Según los datos recopilados por las estaciones meteorológicas, se midieron precipitaciones acumuladas en 24 horas de 298.97 mm en Cuarto de Máquinas Miravalles, 224.81mm para La Fortuna, 225.3mm para Pozo 29 y 178.1mm para la estación de Río Naranjo. Sin embargo, al realizar los acumulados en 12 horas, se encuentra que las diferencias se reducen poco, indicando que el evento en esta zona fue de alrededor de 12 horas. Estos registros evidencian la severidad al reducirse su duración con acumulados similares (Cuarto de Máquinas Miravalles: 283.89; La Fortuna: 221.99 mm; Pozo 29; 224.29 mm; Río Naranjo: 172.724 mm). En la Figura 4-4 se muestran los acumulados de las estaciones del 24 al 26 noviembre 2016.

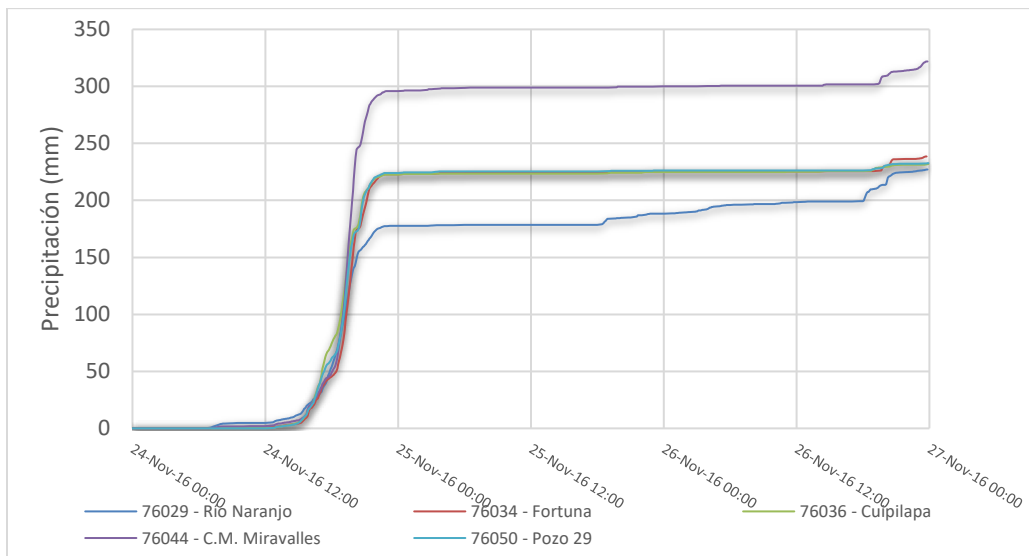


Figura 4-4 Precipitación acumulada del Huracán Otto.

Para las estaciones indicadas se contó con intensidades máximas de 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 360, 720 y 1440 min, realizándose un análisis de probabilidad de excedencia usando la distribución de probabilidad de Weibull, donde la prueba de bondad de ajuste con un nivel de significación de 0.05 aseveró la hipótesis nula, donde los datos se ajustan a la función seleccionada.

Para la determinación de la distribución de precipitación en el modelo hidrológico se contó además con información de las estaciones Canalete, Bijagua y Guayabal donde se comparó el evento de 12 horas con las distribuciones estándar del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de Norte América (NRCS), para los Estados Unidos. Al comparar las distribuciones de las estaciones con los estándares de 12 horas (Figura 4-5), las estaciones presentan un comportamiento similar a la distribución Tipo III del NRCS. Adicionalmente, se calcula la distribución temporal promedio de las estaciones para representar la lluvia en la parte alta de la cuenca del Río Guayabo y Cuipilapa cuando se trabaje con los periodos de retorno.

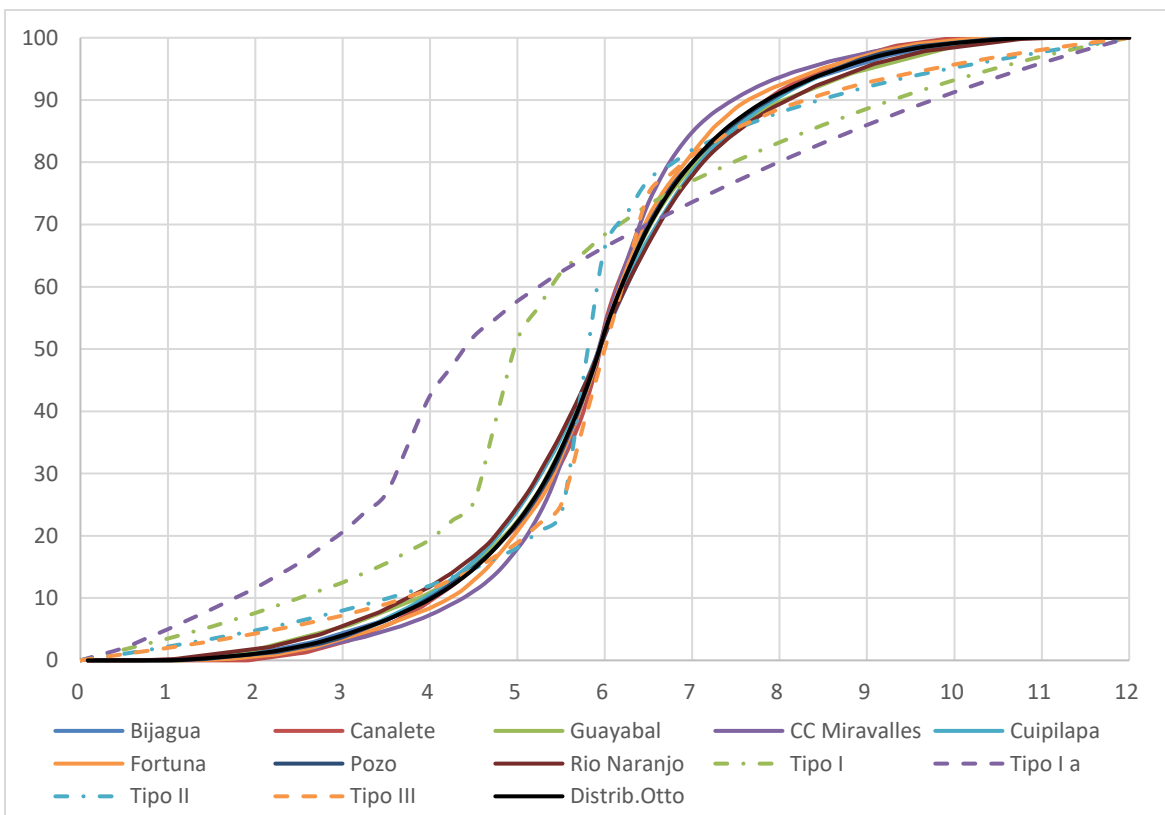


Figura 4-5 Distribución promedio de tormenta 12 horas del Huracán Otto.

4.6 Resultados de Simulación Hidrológica

4.6.1 Resultados del análisis hidrológico

En los resultados del modelo hidrológico para Cuipilapa, se presenta que para la subcuenca de Cuipilapa Alto, se obtuvo el pico de descarga más grande. Esto se debe a que es la subcuenca de mayor tamaño y se encuentra en la zona más alta del modelo. El resto de las subcuencas presentan picos de descarga similares, debido a tener características muy homogéneas en el modelo.

Tabla 4-11 Resultados del modelo hidrológico para la zona de Cuipilapa.

Elemento Hidrológico	Área de drenaje (km ²)	Pico de descarga (m ³ /s)
Cuilapa Bajo	4.37	53.1
Cuipilapa Alto	17.07	235.4
Cuipilapa Alto2	5.31	54.5
Cuipilapa Alto3	4.98	51.8
Cuipilapa Bajo1	3.87	49
Cuipilapa Medio	6.31	54.5
Cuipilapa Medio1	5.32	65.6
Cuipilapa Alto1	2.52	41.7

A la salida del modelo “junction 6” (ver Figura 4-6), se puede observar que el evento presentó un pico máximo de casi 600 m³/s en un lapso corto de tiempo. La zona baja del modelo presenta un cauce bien definido, donde los niveles de agua no ocasionaron tantos daños como en la zona alta.

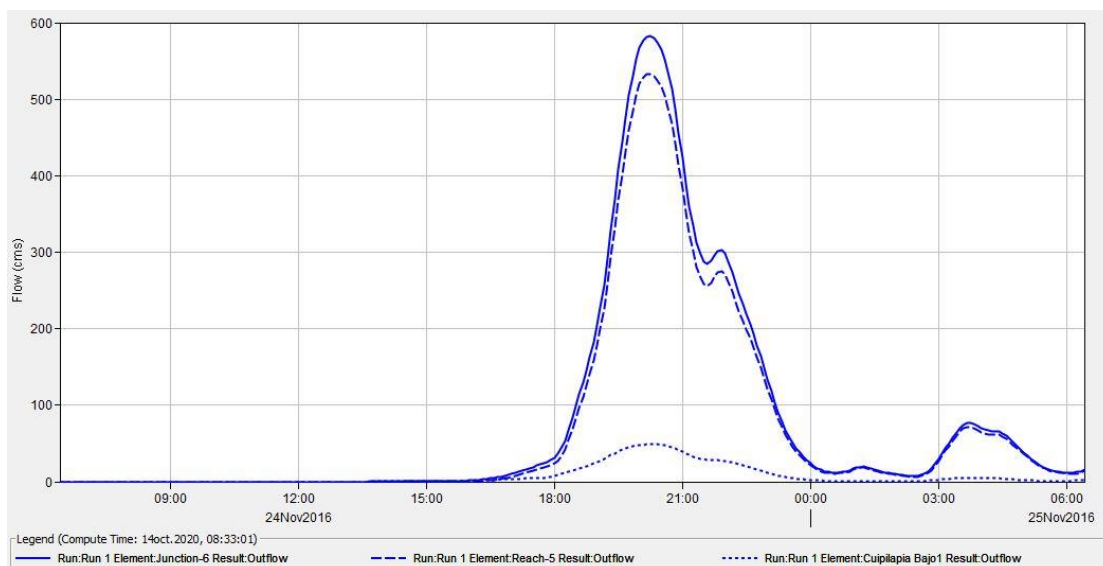


Figura 4-6. Pico de salida del modelo de Cuipilapa.

En el caso del modelo de Guayabo (ver Tabla 4-12) se tiene que la subcuenca con el pico más grande es Guayabo-1, esto es debido a que esta subcuenca es la más grande del modelo. Además, se presentan características topográficas de una zona alta y baja. Las subcuencas con los picos más bajos se encuentran en el área de Quebrada Hornillas, donde sus aportes individuales son bajos, pero en conjunto suman un flujo de agua considerable en una quebrada con sección hidráulica pequeña.

En este caso particular se agregaron 4 uniones en la tabla, debido a que son puntos de ingreso de agua al modelo hidráulico bidimensional. Estos puntos se encuentran en la zona alta del modelo y reagrupan los caudales de salida de las subcuencas altas.

Tabla 4-12 Resultados del modelo hidrológico para la zona de Guayabo.

Elemento Hidrológico	Área de drenaje (km²)	Pico de descarga (m³/s)
Guayabo1	9.88	161.1
Guayabo2	3.09	51.8
Guayabo3	1.56	25.1
Guayabo4	3.53	55.5
Guayabo5	8.19	136.8
Guayabo6	1.48	29.4
Hornillas Alta1	1.08	13.2
Hornillas Alta2	1.14	19.1
Hornillas Alta3	3.63	63.7
Hornillas Alta4	2.01	36.3
Hornillas Alta5	1.00	17.7
Hornillas Alta6	0.28	5.4
Hornillas Baja	1.96	29
Hornillas Media1	0.93	17.2
Hornillas Media2	0.92	16.2
Hornillas Media3	0.18	3.4
Hornillas Media4	0.28	5
Hornillas Media5	2.19	36.8
Hornillas Media6	0.20	4.1
Junction-1	9.88	161.1
Junction-2	3.09	51.8
Junction-4	4.30	77.7
Junction-7	4.14	67.9

A la salida del modelo, tenemos el junction 8 (ver Figura 4-7). Este junction tiene la salida del río Guayabo, Quebrada Hornillas y una Quebrada sin nombre. Además, la ubicación de este punto presenta una topografía muy plana. El pico máximo es de casi 850m³/s, este valor y la duración del evento también son mayores que el modelo de Cuipilapa.

Las razones de este comportamiento son muy variadas, desde el tamaño del modelo hasta las características de cada uno de estos. La relevancia de este punto de salida es que se ubica cercano a los pueblos de la zona, por lo que se convierte en un punto de particular interés.

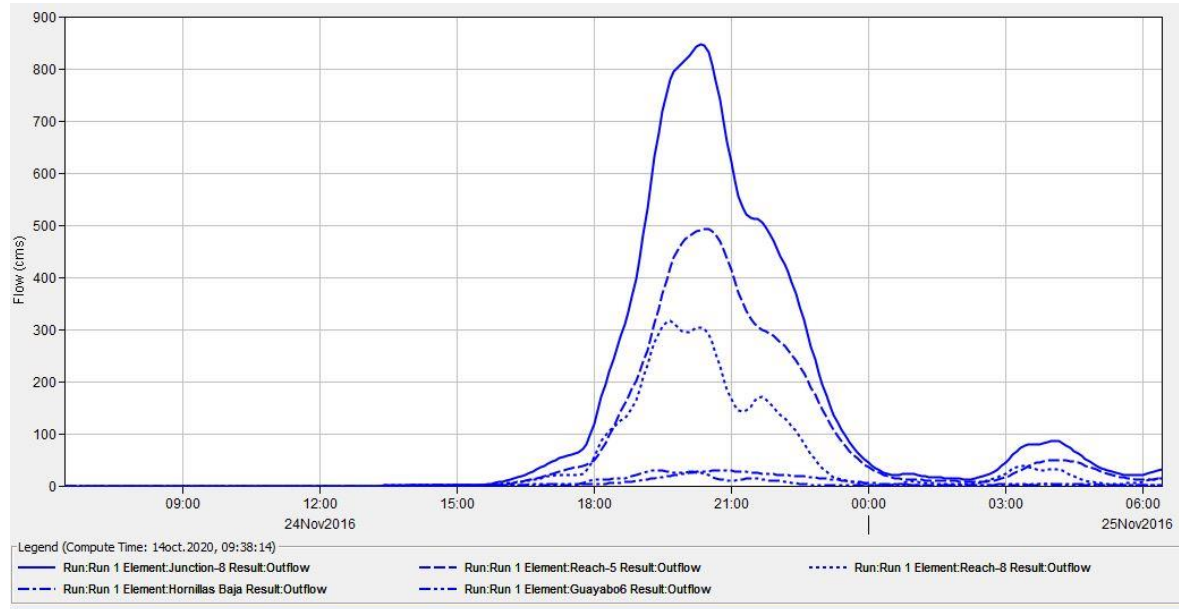


Figura 4-7 Pico de salida del modelo de Guayabo.

5 Modelación hidráulica

5.1 Zona de estudio hidráulico.

Se analizó el comportamiento para los cauces ubicados en Quebrada Hornillas Río Guayabo y Río Cuipilapa. En los mismos se realizó un estudio preliminar el cual consistió en visitas de campo, levantamiento de perfiles, consultas a los habitantes de la zona y una revisión de la topografía en sitio, así como de las condiciones hidráulicas de los canales. Esto con el objetivo de mejorar el criterio experto en el análisis de las zonas de inundación en el modelo hidráulico bidimensional en el programa FLO-2D.

El área de estudio para la modelación hidráulica fue redimensionada a las zonas de afectación eliminando las zonas altas. El nuevo límite de las modelaciones hidráulicas se puede observar en la Figura 5-1 para Río Guayabo y Quebrada Hornillas, en el caso de Cuipilapa se presenta en la Figura 5-2. Estos modelos se dividieron con respecto a las poblaciones más afectadas de la zona y la topografía. Para el río Guayabo se comprende una zona amplia debido a las características topográficas y fluviales.

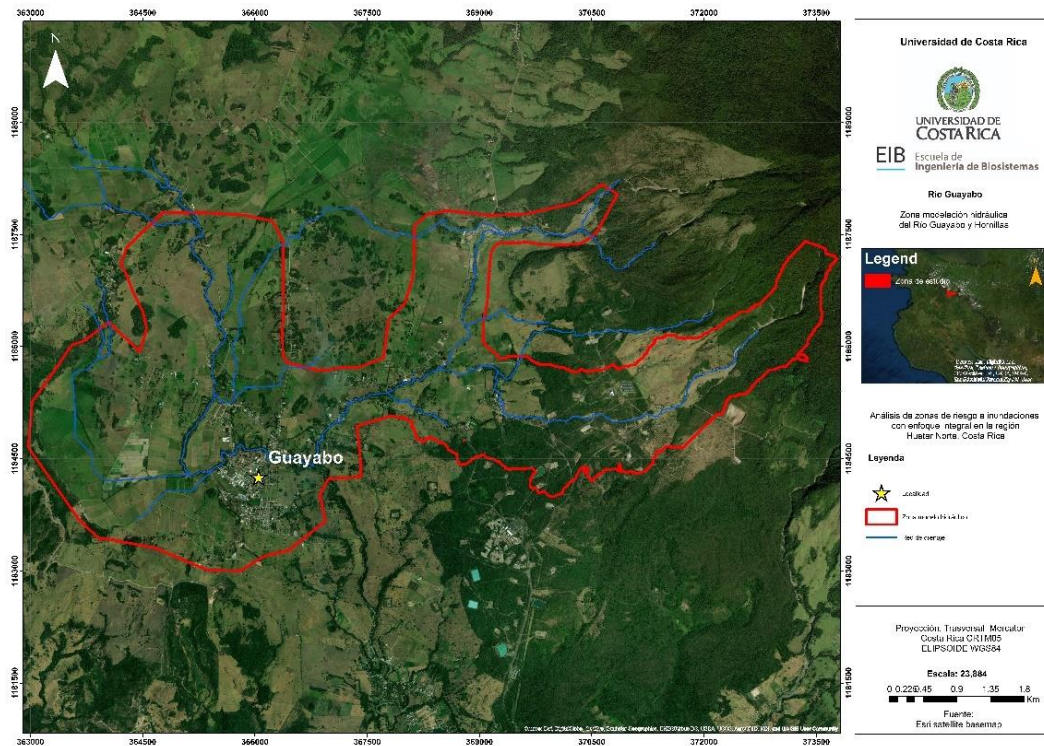


Figura 5-1 Mapa de la ubicación de la zona de modelaje hidráulico para Río Guayabo y Quebrada Hornillas.

En el caso de Cuipilapa se consideró un modelo particularmente largo y angosto en la zona aguas abajo del mismo. Esto debido a la topografía y lo bien delimitado que se encuentra el río. En el cauce principal no tenemos poblados, pero si zonas con cultivos y casas cerca del mismo. El pueblo de Cuipilapa tiene afectación directa por parte de una quebrada, por lo que se incluyó esta zona en el modelo.

En los Apéndices A, B y C se pueden encontrar las fotografías de la infraestructura encontrada, observaciones en campo y apunte de notas de la visita.

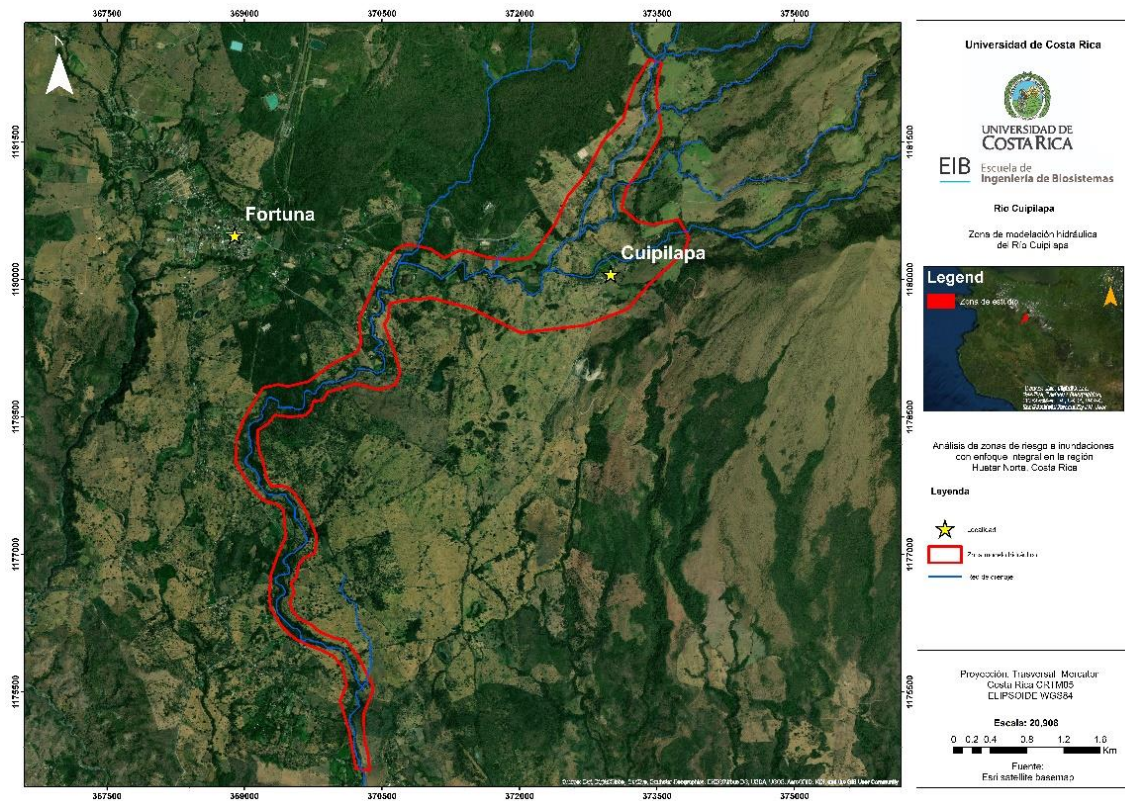


Figura 5-2 Mapa de la ubicación de la zona de modelaje hidráulico para el Río Cuipilapa.

5.2 Visitas de Campo.

Se realizó una gira de reconocimiento de campo en el área de influencia de los ríos Guayabo, Cuipilapa y Quebrada Hornillas. Se obtuvieron fotos del impacto del huracán Otto en la zona, levantamiento de puntos de interés, revisión de puentes y alcantarillas, levantamiento de perfiles de ríos, levantamiento de perfiles de estructuras hidráulicas y hablar con personas afectas durante el evento.

Visita del 24 al 25 de septiembre del 2020

El primer punto visitado fue el cauce del río Cuipilapa, el cual presenta un perfil limpio aguas abajo (Figura 5-3), además de un cauce bien delimitado con presencia de casas cerca del mismo. Durante el evento extremo los habitantes no sufrieron daños en esta zona particular. El poblado de Cuipilapa se encuentra aguas arriba y este sí sufrió afectación por parte de la inundación.

En el caso de las obras de infraestructura hidráulica se encontró un puente aguas abajo, el cual se colocó después del evento extremo. En la parte solo se encontró un sistema de alcantarillas que sirven como un puente, este tiene un problema muy serio de obstrucción por parte de piedras.

Para la parte alta del mismo cauce, encontramos gran presencia de piedras y materiales en el mismo. En la zona más elevada, se encontró un pequeño puente con varios puntos bloqueados. El cauce en esta zona es más amplio y los márgenes de este no son elevados (Figura 5-3).



Figura 5-3. Fotos del cauce del río Cuipilapa en su parte baja y alta respectivamente.

En el caso de la Quebrada Hornillas (Figura 5-4) se encontró un cauce pequeño, con secciones encajonadas por la topografía y otras más amplias. La Quebrada tiene la peculiaridad de pasar por un centro recreativo, en el cual se ha realizado obras sobre el cauce. Esta pequeña quebrada ocasiono daños materiales muy severos, ya que la misma nace en la zona alta donde presenta pendientes fuertes y que durante el evento sufrió deslizamientos de masas de terreno.



Figura 5-4 Fotos de la Quebrada Hornillas.

La última zona visitada fue la de Guayabo (Figura 5-5), esta presenta una topografía plana. Al ser una planicie presenta varios puntos de entrada de agua, los mismos presentan cauces definidos, con poca altura y estructuras cercanas. A la salida del pueblo se cuenta con planicies con cultivos, las cuales se inundan con facilidad. El poblado central fue parcialmente afectado, debido a una quebrada ubicada en la zona norte del mismo.

En la zona alta del poblado, se observó afectación en diversos puntos. Particularmente este lugar presenta una combinación de altas a bajas pendientes, al ser una zona de transición de montaña a planicie, por lo cual favorece que el agua de escorrentía ingrese con gran velocidad a la parte plana provocando socavación fuerte y desbordamiento de los pequeños cauces. En la zona ocurre un fenómeno interesante, ya que aguas abajo al tener cultivos y ser tan plano, proporciona funciones de zonas de recarga y amortiguamiento de caudales, esto provoca que no toda el agua de la zona termine en un cauce instantáneamente y que se formen zonas de encharcamiento prolongado.



Figura 5-5 Fotos de la topografía y cauces cercanos al pueblo de Guayabo.

Puntos levantados en Campo.

Durante las visitas de campo, se mapeo la inundación en las diferentes zonas del modelo bidimensional. La información de estos puntos varía dependiendo de la zona, incluyendo puntos generales, estructuras hidráulicas, puntos relevantes y niveles de inundación. Esta información recopilada permite caracterizar de manera más precisa el impacto del evento extremo.

En el caso de Cuipilapa (Figura 5-6) se tienen pocos puntos visitados, esto se debe a la accesibilidad del cauce del río. El punto en la parte baja corresponde al puente construido después del evento extremo. Para la zona alta se cuenta con acceso por medio de calles de lastre y entradas a fincas privadas, lo cual facilitó encontrar estructuras hidráulicas como el alcantarillado con problemas de bloqueo de piedras.

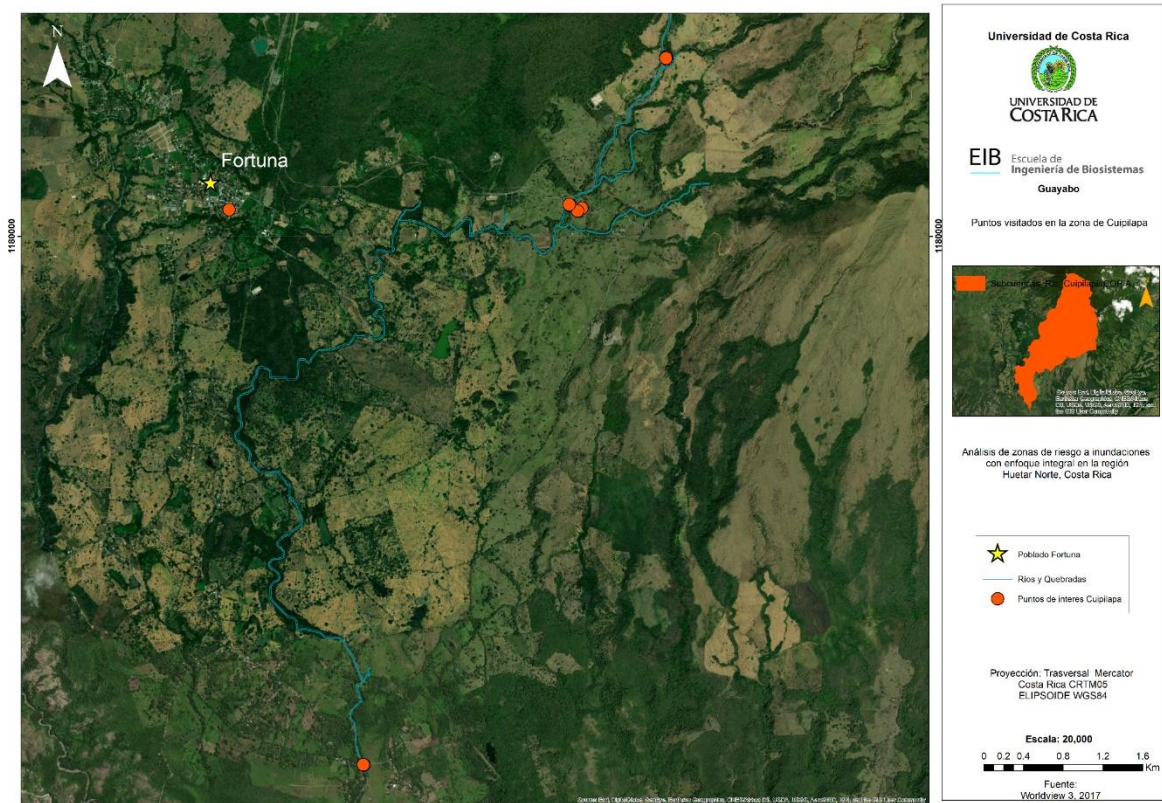


Figura 5-6 Puntos de interés en Cuipilapa.

En la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas se cuenta con una serie de puntos distribuidos por toda la zona de estudio. El acceso a los cauces fue más factible y se encontró con colaboración de pobladores para entrar a zonas privadas. Entre los puntos destacan puentes en la parte alta y la Laguna Mogote en la zona baja. Esta laguna es un punto que funciona como zona de amortiguamiento de impacto de escorrentía manteniendo los niveles de inundación bajos para esta región.

En el poblado de Guayabo destacan los puntos dentro de la zona urbana, ya que sirven de referencia para el alcance de la inundación. Además, en esta zona se cuenta con puntos que están por fuera del modelo hidráulico, pero dan una perspectiva del alcance, impacto a la salida del agua de este.

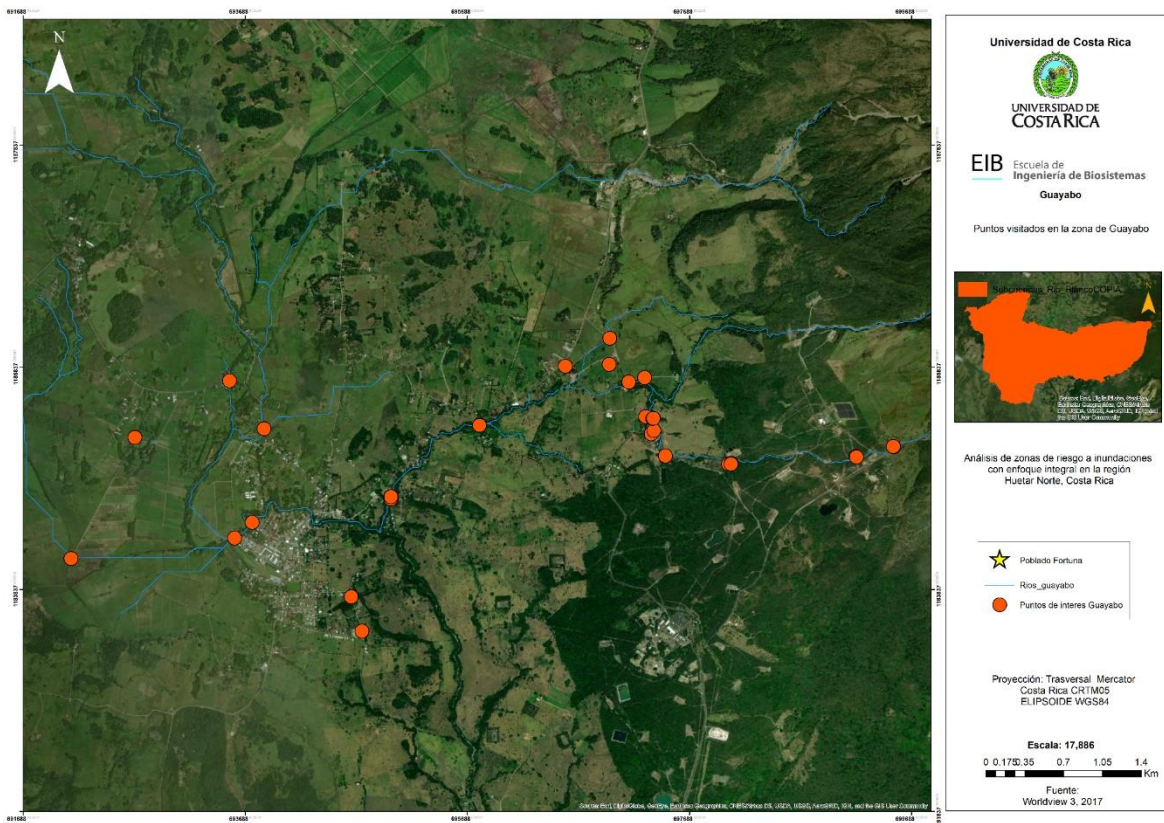


Figura 5-7 Puntos de interés para Guayabo y Quebrada Hornillas

5.3 Geometría del río y de las planicies para la modelación

Para la modelación bidimensional en las dos zonas, se utilizó una malla de 5m (ver Tabla 5-1). Esta se conforma con información de elevación del DEM, límites para número Froude, n de Manning, entradas y salidas de agua. En el caso particular de Guayabo y Quebrada Hornillas se cuenta con la mayor cantidad de elementos, obteniendo el modelo más complejo.

Tabla 5-1 Caracterización del modelo bidimensional en Flo2D

Zona	Área (km ²)	Malla (m)	Número de elementos
Cuipilapa	7.8971	5	315 883
Guayabo y Quebrada Hornillas	21.9729	5	878 915

La construcción del mallado se realizó por medio de la definición del área de modelación, se utilizó la información de modelos de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) provista por la Comisión Nacional de Emergencia (CNE) y la información recopilada de las visitas de campo. Los valores de elevación y n de Manning se asignaron por número de elemento utilizando archivos shapefile (Figura 5-8). Por último, se establecieron las entradas de agua por medio de hidrogramas obtenidos de HEC-HMS y se estableció la salida del agua en la parte baja del modelo, tomando en cuenta lo visto en la gira. La conformación del modelo para cada zona presenta variaciones según las características topográficas, estructurales y climáticas

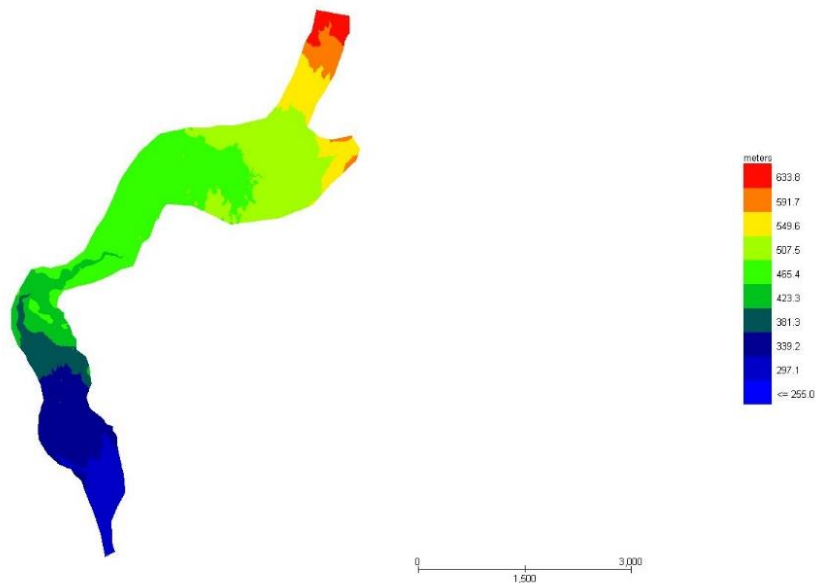


Figura 5-8 Modelo de elevación digital en el área del estudio bidimensional para Cuipilapa

5.4 Coeficientes de rugosidad.

Para los coeficientes de rugosidad se establecieron una serie de valores (Tabla 5-2) para cada una de las coberturas establecidas en el uso de suelos. El mapa de uso de suelos se afinó manualmente para cada área, buscando tener datos más exactos por zona. En el caso de las nubes se consideró una n de Manning de 0.15 ya que estos pixeles estaban ubicados cerca de bosques en la imagen satelital.

Tabla 5-2 Valores de N de Manning para las diferentes coberturas de suelo.

Cobertura	N Manning
Agua	0.055
Bosque	0.15
Bosque seco	0.14
Caña	0.1
Manglar	0.055
Nubes	0.15
Pastizal Seco	0.06
Pastos	0.06
Suelo desnudo	0.022
Urbano	0.018

En el caso de Cuipilapa se observa un predominio de suelo desnudo en la parte alta y baja (ver Figura 5-9)1, esto ocasiona que el flujo de agua se mueva con mayor facilidad y velocidad, a comparación de los bosques que encontramos en la zona intermedia baja, los cuales favorecen la reducción de la velocidad del agua, restando el impacto en las zonas aledañas y bajas. Aun así, la zona baja al presentar suelo desnudo y contar con pendientes considerables, tiende a ser una zona de cuidado o vulnerable tanto a generar escurrimientos altos como a presentar deslizamientos.

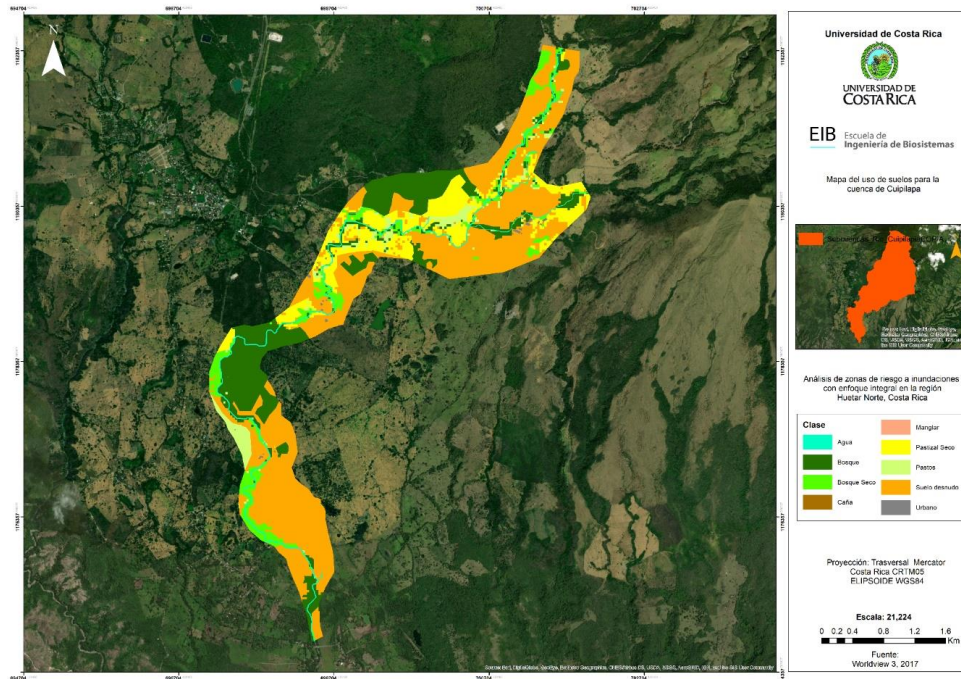


Figura 5-9 Mapa de uso de suelos afinado para la zona de Cuipilapa.

Para el caso de Guayabo y Quebrada Hornillas en general hay predominancia de pastos y pastizal seco, lo cual favorece el paso del agua, al no ser un gran obstáculo. En la zona alta si tenemos una predominancia de bosques, con algunos parches por toda la zona de estudio. Es importante mencionar que la zona es bastante plana, lo cual evita tener velocidades muy altas en la mayoría de los lugares, presentando una función de amortiguamiento de caudales.

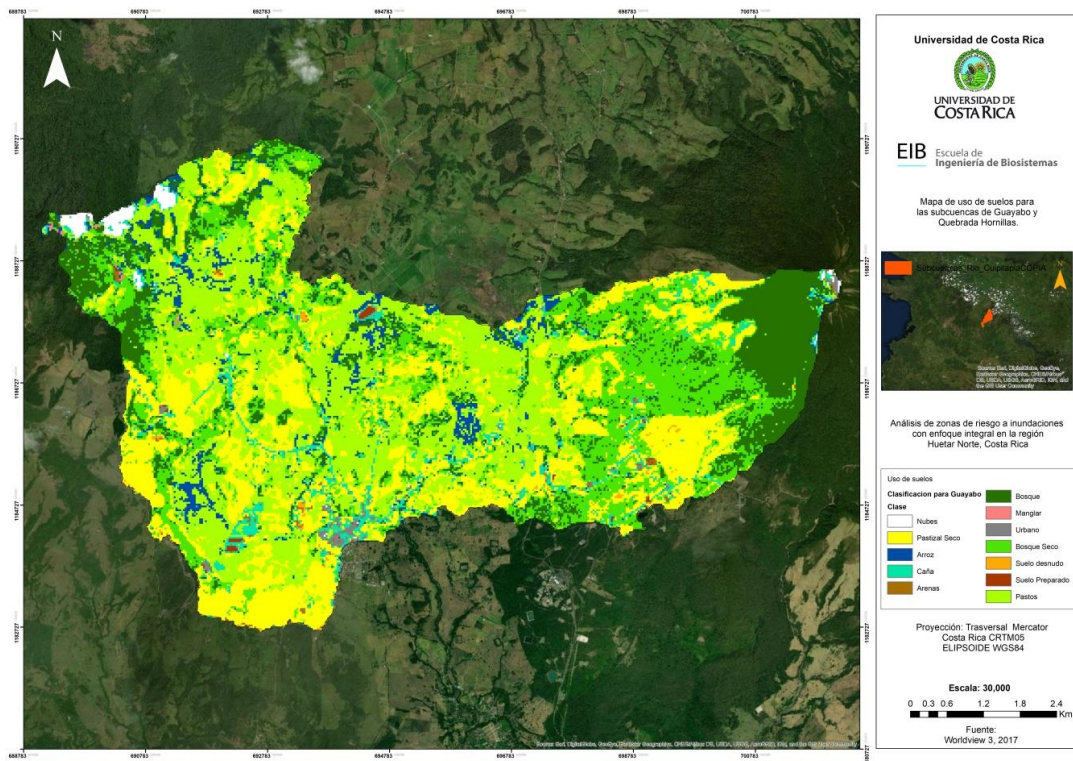


Figura 5-10 Mapa de uso de suelos afinado para la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas.

5.5 Condiciones de borde y régimen de flujo

Las condiciones de borde se establecen en las entradas y salidas de los hidrogramas que va a tener el modelo bidimensional para transitarlos a lo largo de los canales. Estas se definen por número de elemento y varían en base de las subcuencas definidas en la modelación hidrológica. Cada modelo hidráulico tendrá entradas y salidas diferentes, considerando las condiciones de la topografía y la distribución de subcuencas. Cada subcuenca brinda un hidrograma de entrada al modelo hidráulico según su ubicación.

La correcta asignación de estas condiciones permite generar estabilidad en los cálculos que realiza el programa y proporciona los resultados más acordes a la realidad. Es importante

mencionar que los primeros metros después de una entrada de agua se deben de tomar como zona de transición, para que el flujo se adecue a las condiciones de la malla.

El modelo trabaja con flujo subcrítico y supercrítico según las condiciones particulares para cada elemento de la malla. En el caso de tener números de Froude muy elevados en zonas planas, se puede establecer límites para forzar el tipo de flujo en elementos específicos. Estas modificaciones se verifican por elemento para garantizar estabilidad en el cálculo y no generar resultados enmascarados.

En la Figura 5-11 se observan las condiciones de borde para el modelo de Cuipilapa. Se cuenta con 7 hidrogramas de entrada, los cuales están distribuidos en base a las subcuencas que afectan directamente la zona. Se cuenta con una serie de entradas directamente en el cauce del río Cuipilapa y con entradas indirectas en quebradas como la C6, C5 y C2.

Las salidas del modelo se establecieron en la zona baja del área de estudio, ya que se presenta una condición donde el flujo se ve obligado a ir por una única ruta debido a las características topográficas de la zona. En este caso se estableció que todo el elemento de la parte baja fueran nodos de salida, considerando un poco las curvas fuertes que tiene el cauce. Es importante considerar estos elementos como posibles salidas en caso de desbordamiento manteniendo el balance de masa del modelo.

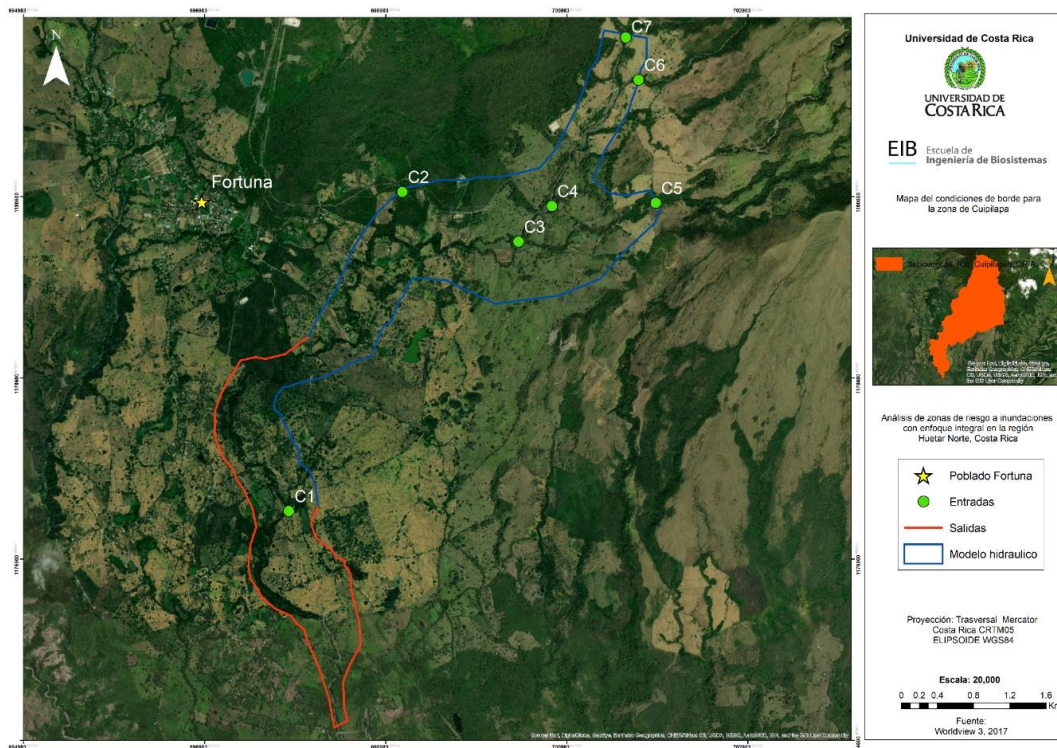


Figura 5-11 Ubicación de las entradas y salidas de agua en la zona de Cuipilapa

En el caso de Guayabo y Quebrada Hornillas (ver Figura 5-12), tenemos un total de 17 Hidrogramas de entrada. La mayoría de estos contribuyen a Quebrada Hornillas Alto (HA1, HA2, HA2, HA3, HA4, HA5 y HA6) y Quebrada Hornillas Medio (HM1, HM2, HM3, HM4, HM5), esto debido a las condiciones topográficas de la zona y la conformación de la red de drenaje. Para esta zona también se consideró usar un junction, ya que dos subcuencas pequeñas tenían salida de agua muy cercanas y con poco caudal de salida, por lo que se decidió simplificar este elemento y facilitar el cálculo.

El área de Guayabo es plana, por lo que tenemos subcuencas de mayor tamaño aportando agua en áreas de mayor extensión. Por estas condiciones planas, se tomó la decisión de ampliar el área de salida de agua. Para evitar niveles de agua enmascarados por tener un modelo cerrado en la parte sur (línea roja). Se trabajó con 6 hidrogramas de entrada a lo largo de los cauces principales de entrada al modelo y nuevas áreas contributivas en el centro del modelo hidráulico.

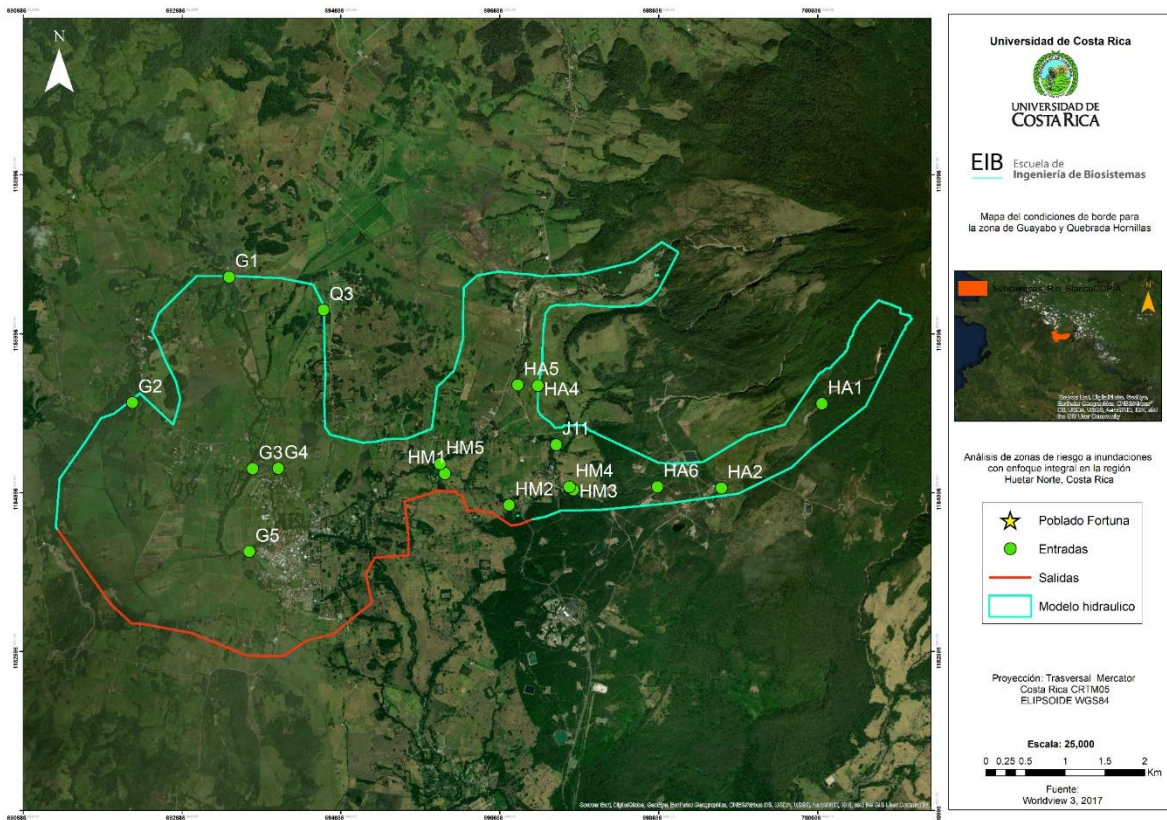


Figura 5-12 Ubicación de las entradas y salidas de agua en la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas

5.6 Escenarios hidráulicos

Las modelaciones bidimensionales que se realizaron por zona de estudio consideraron una serie de escenarios con diversas condiciones. Estas condiciones buscan conocer un comportamiento más amplio de la inundación y obtener el resultado más acorde a la realidad de la zona. Los escenarios evaluados fueron con un número de curva (CN) de tipo II (condiciones de humedad normal en suelos) y tipo III (condiciones saturadas de suelos), considerando un flujo de agua limpia. En el caso del CN de tipo II se consideró adicional un escenario con flujo de lodos, tomando las condiciones de cada zona para cada modelo. Estas condiciones fueron analizadas para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años para conocer a detalle el comportamiento de la inundación y tener una caracterización del evento extremo para cada modelo.

5.6.1 Análisis hidráulico para condiciones de Otto y agua limpia

5.6.1.1 Resultados para Cuipilapa con un CN tipo II y el Huracán Otto

Los resultados de la modelación con la lluvia del huracán Otto y un número de curva tipo II se pueden ver en la Figura 5-14. En esta modelación se obtienen alturas máximas de 7m en la parte baja y media del modelo. Esto ocurre por las condiciones topográficas, ya que el cauce se encañona desde la zona media, sirviendo como un tipo de embudo, ya que antes se cuenta con una zona amplia con topografía relativamente plana.

La zona alta presenta una amplitud en el área de afectación por la inundación con profundidades variables. En esta zona se encuentra el poblado de Cuipilapa, el cual se vio afectado por la inundación.

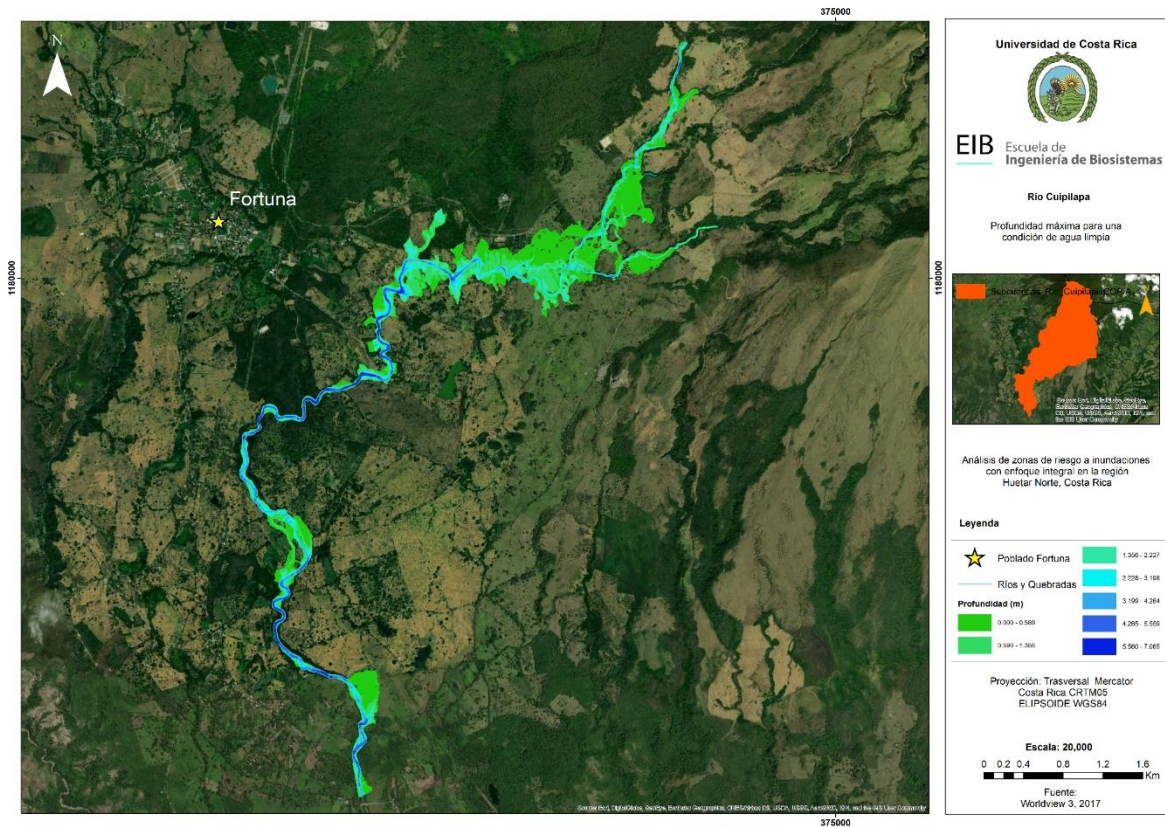


Figura 5-13. Profundidad de agua para Cuipilapa con CN tipo II y agua limpia para el Huracán Otto.

En el caso de los resultados de velocidad se cuenta con valores máximos de 7.8 m/s debido a las fuertes pendientes, las cuales se encuentran por todo el cauce principal. Estos valores son más predominantes en la parte media y baja, donde tenemos secciones más angostas y encausadas. En las zonas cercanas al cauce del río se cuenta con velocidades elevadas y potencialmente peligrosas.

Es importante mencionar que en la parte baja y media, no tuvieron problemas de inundación, solo hubo afectación en el cauce principal en la zona baja en un puente por socavación y fuertes velocidades, confirmando que el modelo se está comportando de manera correcta.

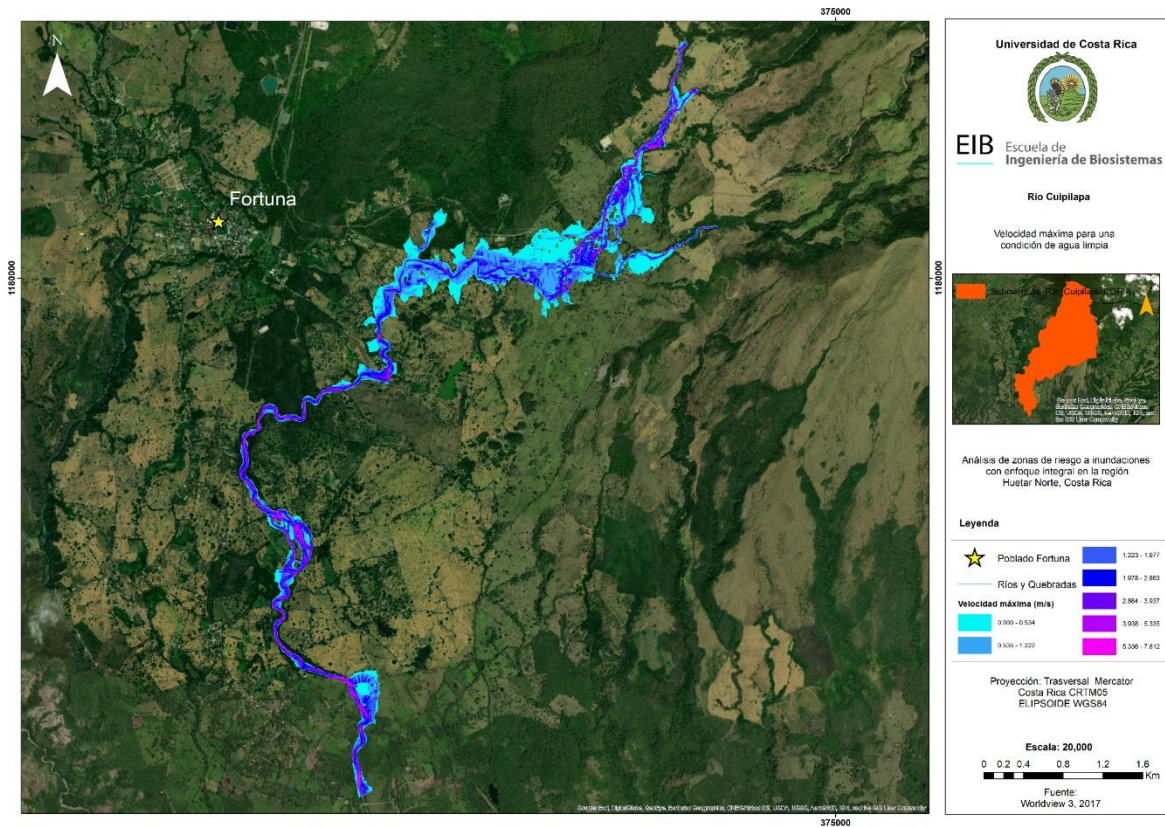


Figura 5-14 Velocidad de agua para Cuipilapa con CN tipo II y agua limpia.

5.6.1.2 Resultados para Cuipilapa y un CN tipo III

El considerar una condición de humedad en el suelo antes de que ocurra el evento, ocasiona un aumento considerable en los niveles de agua y en las velocidades. Por lo que tomar en cuenta este escenario permite tener un análisis más completo del fenómeno en la zona. En las zonas más críticas se tienen aumentos de un poco menos de 2 metros de altura en comparación a los resultados considerando un CN tipo II.

Los resultados muestran un aumento en el área de afectación por la inundación debido a la condición mencionada anteriormente. Este aumento muestra un mayor impacto en la parte media y alta. En el caso de la zona baja, tenemos un escenario con mayores alturas en el cauce (ver Figura 5-15).

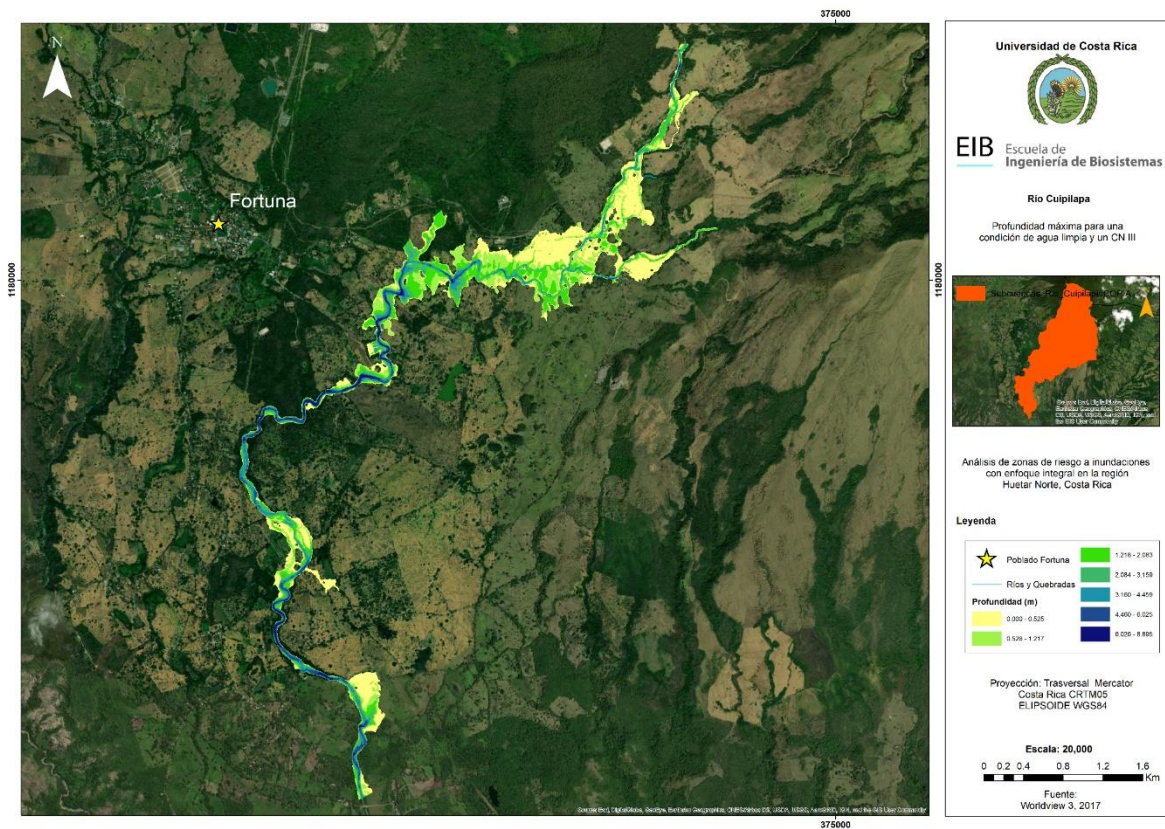


Figura 5-15 Profundidad de agua para Cuipilapa con CN tipo III y agua limpia

En el caso de las velocidades máximas se puede llegar a tener hasta 9.2m/s aproximadamente a lo largo de todo el cauce del río principal, el contar con pendientes fuertes enfatiza estas velocidades. En la zona central tenemos un área de afectación mayor y las velocidades son bastante peligrosas, con la posibilidad de realizar daños considerables en la zona (ver Figura 5-16).

En la zona media y baja, tenemos picos de velocidad en todo el cauce principal, ampliando un poco su área de afectación con estos valores. Al tener un cauce encajonado estas velocidades convierten el lugar en una zona crítica, debido a la presencia de casas cerca del cauce. Durante las visitas los habitantes no mencionaron tener afectación, pero viendo los resultados, son zonas que se deberían de poner mayor atención dado el riesgo a socavación de la margen y el fondo del cauce afectando la infraestructura.

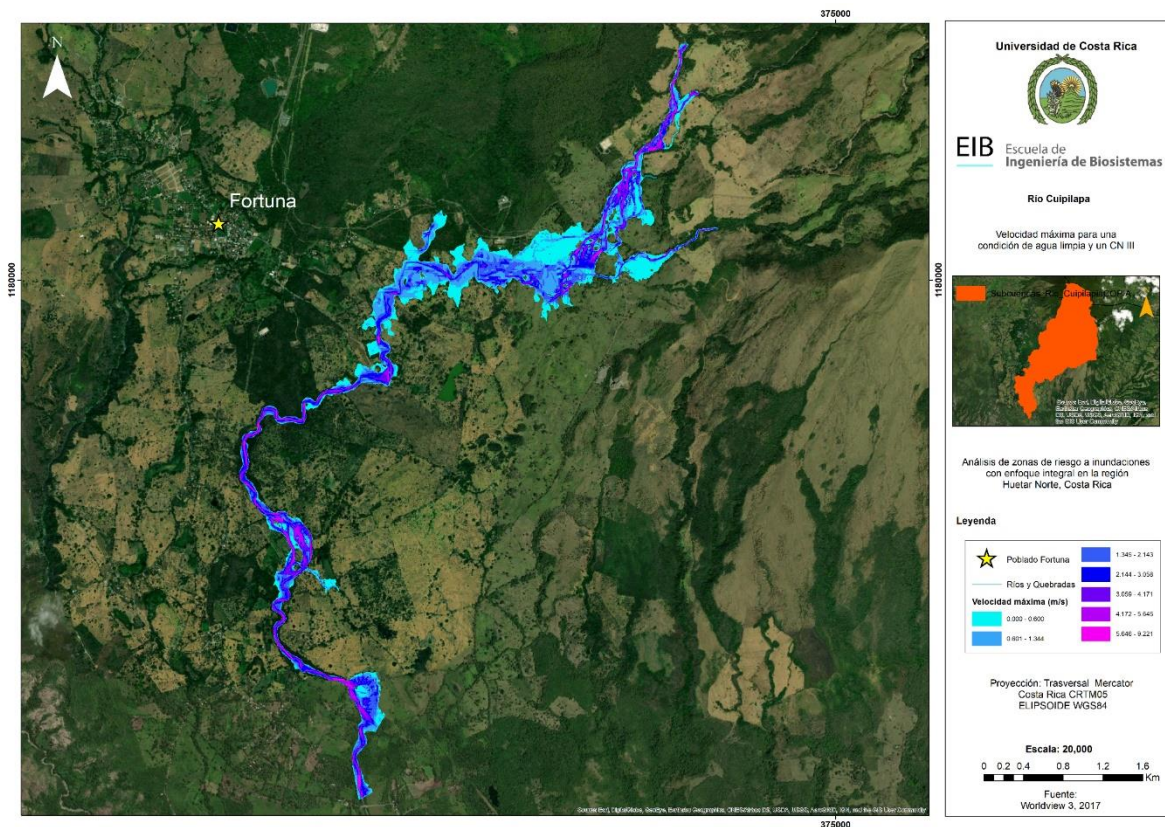


Figura 5-16 Velocidad de agua para Cuipilapa con CN tipo III y agua limpia.

5.6.1.3 Resultados para Guayabo y Quebrada Hornillas con un CN tipo II y el Huracán Otto

En el caso particular de la modelación de Guayabo y Quebrada Hornillas para el evento del Huracán Otto y un CN de II se tiene una mayor área de modelación, teniendo un modelo más complejo. En la Figura 5-17 se puede observar cómo se distribuye la inundación con la particularidad que en la zona más alta de la Quebrada Hornillas el cauce se encuentra más encañonado. Una vez la topografía se vuelve plana los márgenes de la inundación aumentan en zonas de amortiguamiento presentando niveles inferiores a 0.444 metros.

En el caso de la zona cercana al poblado de Guayabo, no se cuenta con una diferencia de pendientes tan grande teniendo como consecuencia manchas de inundación mayores. En esta zona en particular tenemos alturas que no superan los 1.7m ya que el agua se distribuye por un área plana y de mayor área. El cauce que pasa por el pueblo de Guayabo y que se alimenta de Quebrada Hornillas tenemos valores de hasta 8m de altura, convirtiendo estos cauces en un peligro para las comunidades cercanas.

Para el modelo en general tenemos un promedio de 0.790m de altura, aunque este valor sea relativamente bajo, es importante recordar las diferencias topográficas de la zona.

Por lo cual no se debe de considerar como un valor de referencia, dadas las pendientes que se tienen.

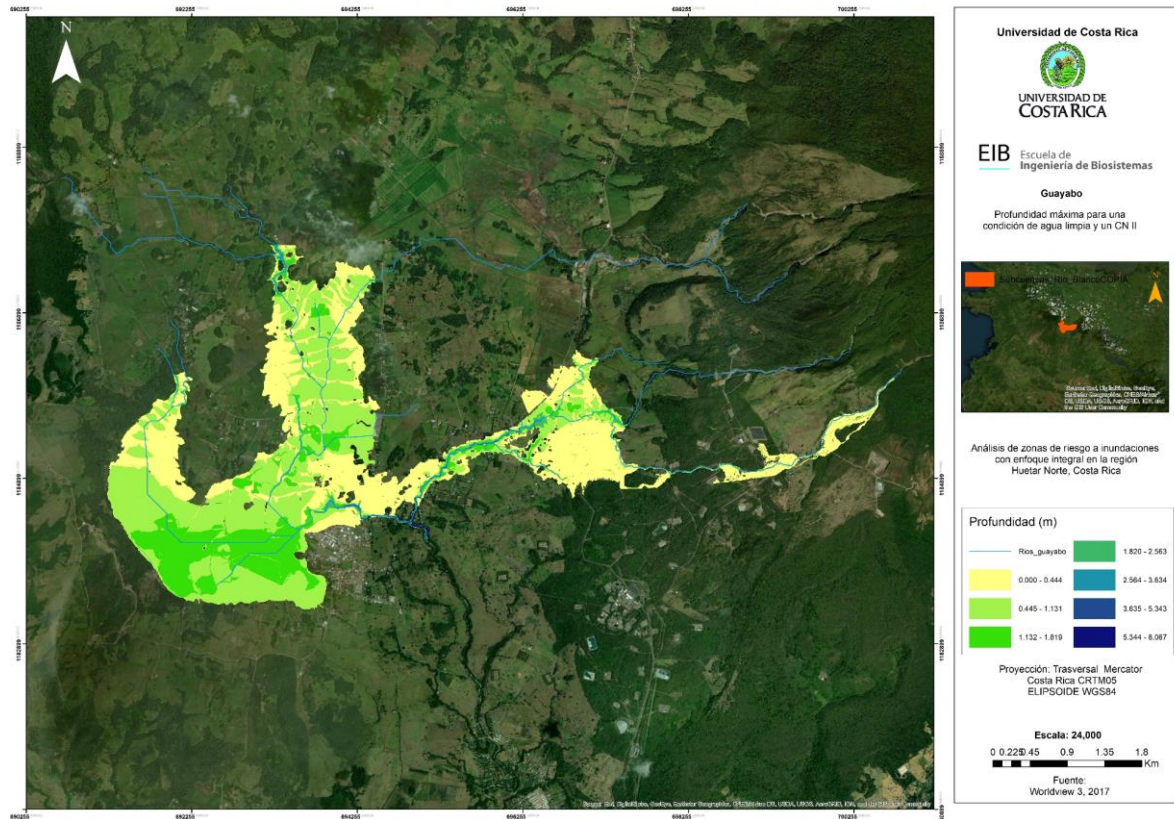


Figura 5-17 Profundidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II.

En el caso de la velocidad para estas condiciones, concretamente se presentan velocidades de hasta 7.7m/s en el cauce principal. Estos valores ocasionan daños severos a lo largo de estas secciones. Toda esta zona sufrió de un impacto fuerte por el evento extremo, debido a las pendientes fuertes y no tener un cauce muy definido. En el caso del centro del poblado de Guayabo, tenemos velocidades altas que se encuentran en el cauce, el cual no afecto a todo el poblado (ver Figura 5-18). En las subcuencas de Guayabo se generaron bajas velocidades, ubicadas en la zona del Lago del Mogote. Por la topografía plana, esta zona incluso sirve como medio natural para mantener la inundación controlada, con la única problemática de ser una zona para cultivos, ocasionando otro tipo de pérdidas si se mantiene anegada por mucho tiempo. En términos generales las velocidades mayores están en cauce y en los alrededores de este, pero en el resto del modelo se presentan velocidades inferiores a 1 m/s, las cuales no dejan de ser un peligro que considerar.

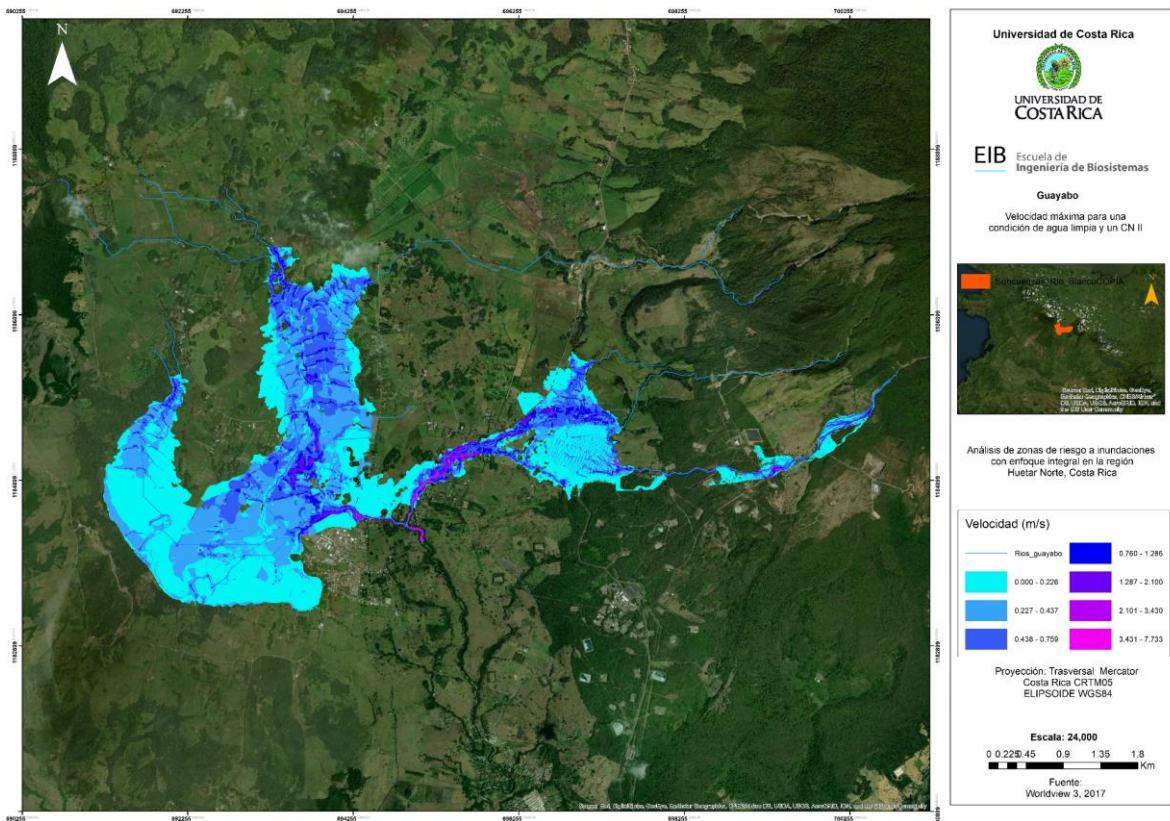


Figura 5-18 Velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II.

5.6.1.4 Resultados para Guayabo y Quebrada Hornillas con un CN tipo III

En este escenario al tener una condición de humedad en suelo saturada y como ocurrió en el modelo de Cuipilapa, tenemos un aumento general de las alturas y las velocidades. Pasando a tener incluso un incremento de unos 10cm de altura en comparación con el CN tipo II en promedio. Esto provoca un mayor impacto en el poblado de Guayabo y un aumento importante en la llanura de inundación en Quebrada Hornillas (ver Figura 5-19).

En el caso de la zona este del poblado de Guayabo, tenemos un aumento en la altura, pero no en la amplitud de la inundación. Esta zona se mencionó que es bastante plana, pero alrededor de la misma tenemos zonas de mayor altura. Esto provoca que la inundación se quede localizada en esta región y la descarga por el cauce principal ocurra de manera lenta.

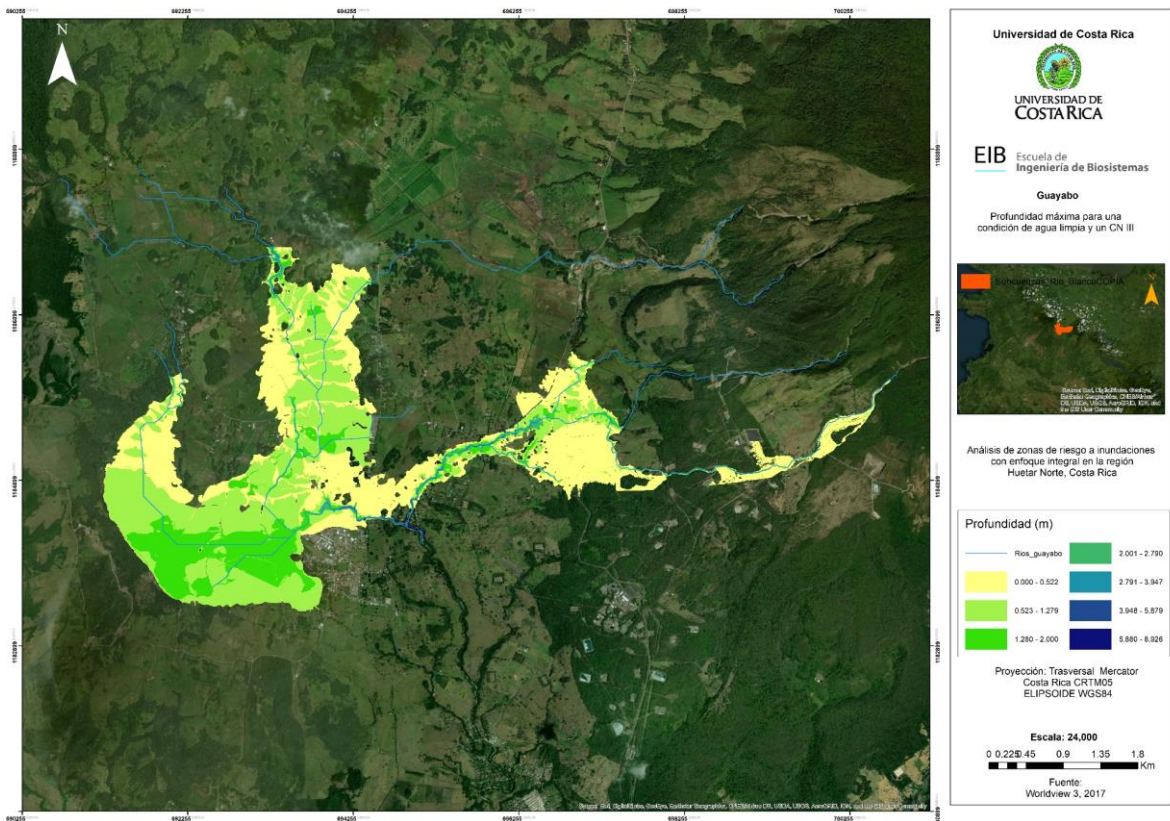


Figura 5-19 Profundidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo III.

En el caso de la velocidad tenemos valores máximos de 7.9m/s, no es un aumento tan elevado en consideración al escenario con CN tipo II. Lo que sí está aumentando son las zonas donde se presentan incrementos de los valores, se sigue identificando los cauces de los ríos y quebradas como punto principal, pero con un área de afectación un poco mayor (ver Figura 5-20). Además, la zona donde se ubicaba varios centros turísticos cuenta con velocidades elevadas, pero no alturas grandes. Toda esta zona fue devastada por la inundación y la causa sería la combinación entre la profundidad del agua y las altas velocidades generadas.

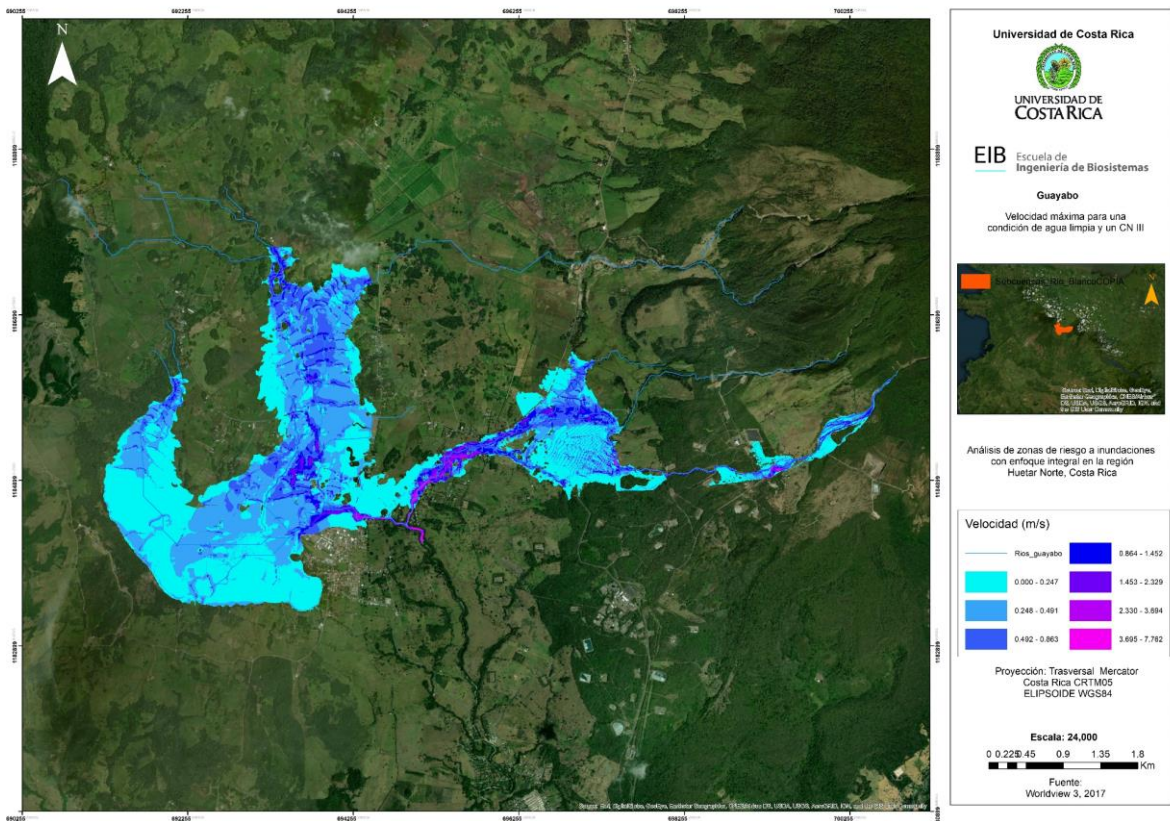


Figura 5-20 Velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo III para el Huracán Otto.

5.6.2 Análisis hidráulico para condiciones del Huracán Otto y flujo de lodos

El evento del huracán considerando la concentración de volumen de sedimentos (CV), representa un cambio fuerte en las condiciones del modelo. Al contar con esta condición provoca que el flujo de lodos aumente los volúmenes de agua y la cantidad de material en los cauces evaluados. Este escenario es bastante crítico dada el aumento de los niveles de agua y velocidades.

5.6.2.1 Resultados para Cuipilapa con CN tipo II y CV: 0.55 con evento del Huracán Otto

En Cuipilapa la presencia de lodos y una condición de número de curva tipo II ocasiona un aumento considerable de los niveles de agua ya que se pasa de alturas promedios de 1.42m a 2.11m en el modelo. La ubicación de las alturas máximas se mantiene igual, pero se llega a tener alturas superiores a los 9m, además de un aumento de su área de influencia (ver Figura 5-21). En este caso los daños al cauce principal son considerablemente grandes por lo que cualquier modificación en este puede afectar directamente a las zonas cercanas.

En este caso se seleccionó un CV:0.50 debido a que en la zona alta se encontró gran cantidad de piedras, árboles y otros objetos. En la zona baja se encontró presencia de estos, pero en menor medida.

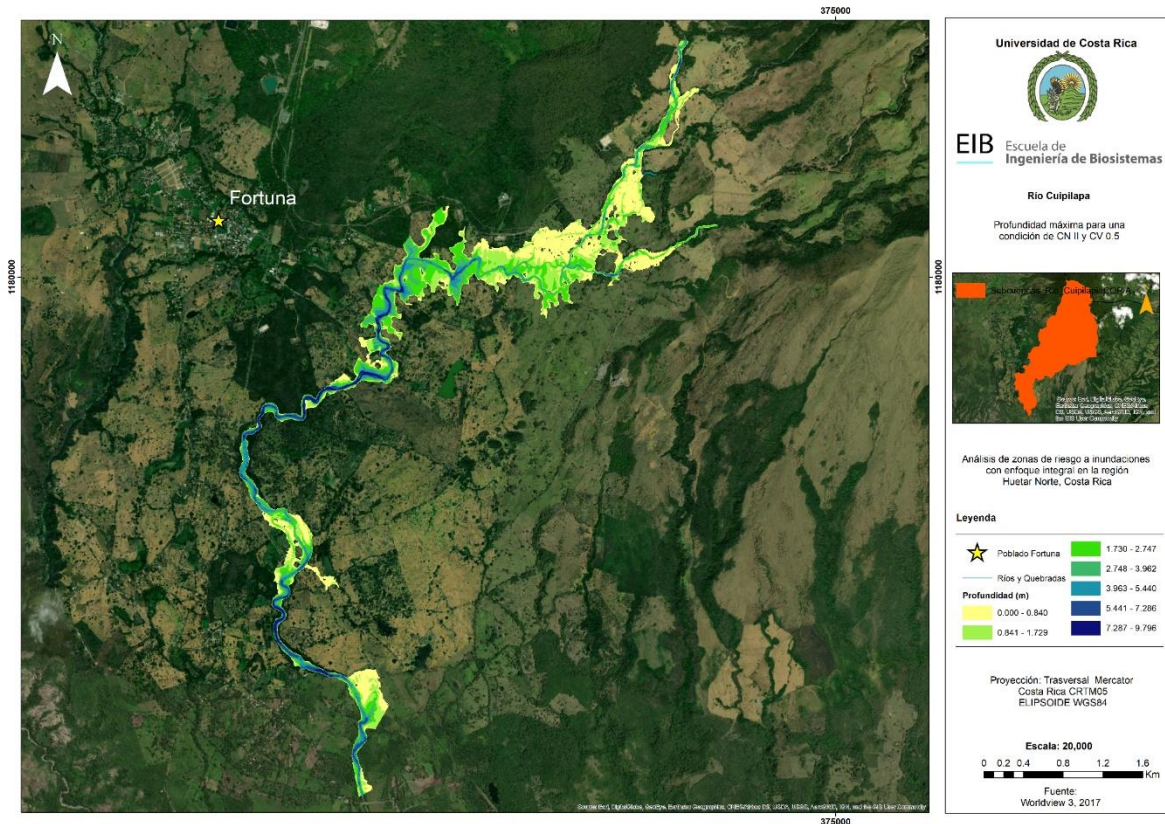


Figura 5-21 Profundidad de agua para Cuipilapa con CN tipo II y CV:0.5.

La velocidad es otra variable con un aumento considerable ya que se tienen valores máximos aproximados a los 9.5m/s. Estos valores son muy peligrosos, debido al impacto que puede tener en la zona. La zona baja presenta varias curvas pronunciadas del cauce, por donde el agua a la salida aumenta su área de afectación (ver Figura 5-22).

En promedio la modelación da valores de velocidad de 2.11m/s, los cuales se encuentran en su mayoría en las márgenes del río, ya que en el cauce principal se tiene los valores superiores. Este escenario es el que genera mayor impacto en la zona, convirtiendo todo el cauce en un peligro grave. Aun con estas condiciones, el cauce en la zona baja se mantiene bastante encajonado debido a la topografía de este, de igual manera no deja de ser un peligro para las personas que vivan cerca del cauce y la infraestructura.

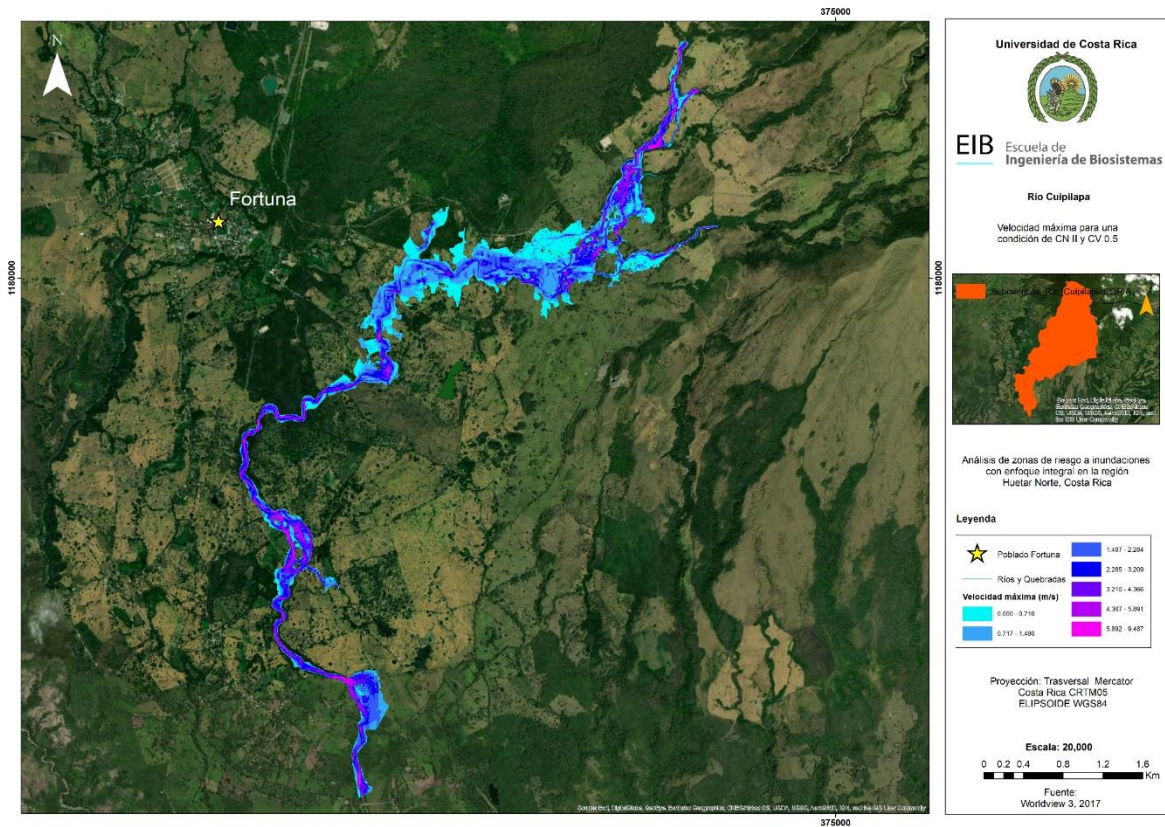


Figura 5-22 Velocidad de agua para Cuipilapa con CN tipo II y CV:0.5

5.6.2.2 Resultados para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II y CV: 0.40

En el caso de Guayabo y Quebrada Hornillas al considerar la condición de lodos para el Huracán Otto el modelo cuenta con alturas máximas cercanas a los 10.3m en el cauce principal. Estos valores pueden causar daños considerables en el poblado de Guayabo. En promedio se da un aumento 21cm en la inundación en comparación al modelo con agua limpia.

En la Figura 5-23 se puede ver la distribución de la inundación en este escenario, la amplitud de fenómeno es la más crítica. En la zona baja y media para Quebrada Hornillas tenemos un aumento considerable de la inundación, esto no ocurría en los escenarios anteriores. La zona de la Laguna Mogote sufre un aumento en sus niveles de agua, aunque todavía funciona como zona de recarga.

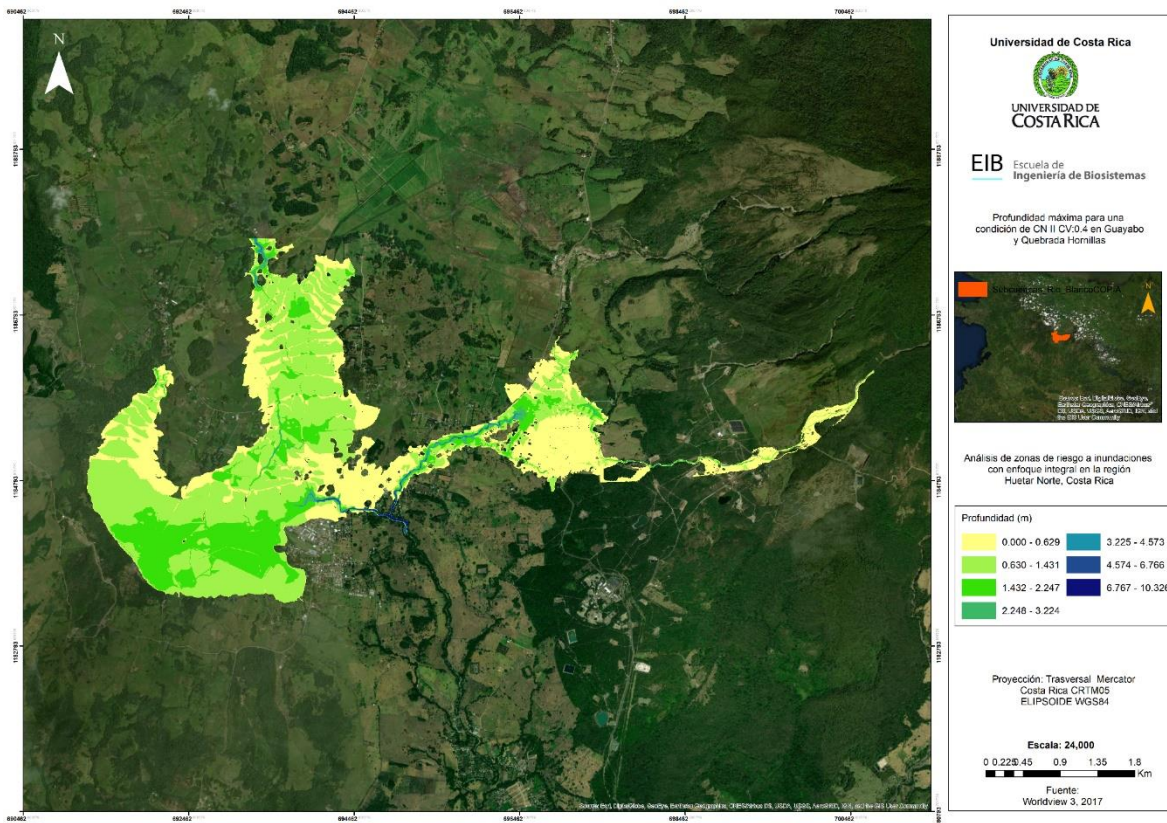


Figura 5-23 Profundidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II y CV:0.5.

En el caso de la velocidad (ver Figura 5-24) encontramos valores máximos de 7.9m/s ubicados en diferentes regiones del modelo. Esta distribución vuelve peligrosa gran parte de las zonas urbanas en Quebrada Hornillas, este fenómeno ocurre de forma similar en las zonas altas de las subcuencas de Guayabo. Esto se ve favorecido por las pendientes y el uso de suelo presentes en estas zonas, ya que son zonas de transición de elevaciones fuertes a planicies.

En el caso del poblado de Guayabo, el cauce principal se vuelve en un peligro elevado para personas e infraestructura. En la zona de Laguna Mogote se empiezan a ver velocidades mayores y posibles daños en la zona. En términos generales se da un aumento del impacto que recibe todas las zonas.

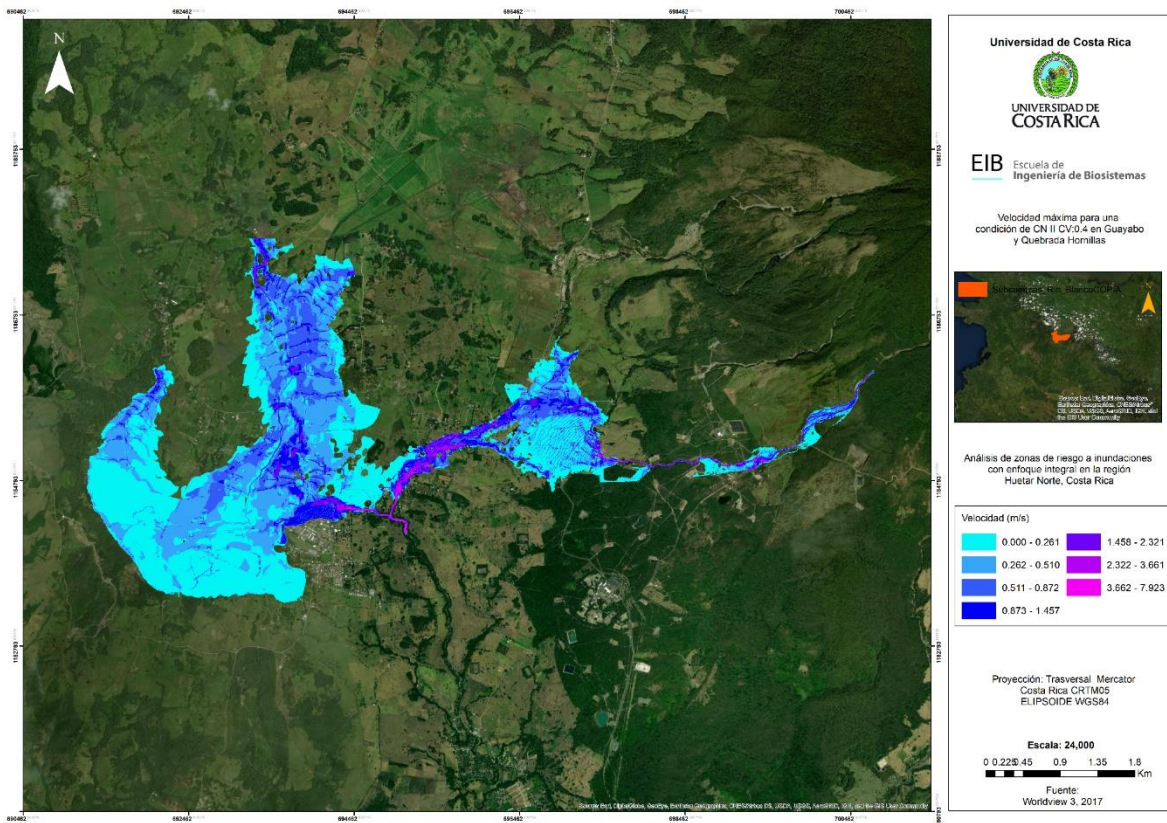


Figura 5-24 Velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II y CV:0.5

5.6.3 Análisis Hidráulico para condiciones existentes para periodos de retorno

5.6.3.1 Resultados para Cuipilapa con CN tipo II y un periodo de retorno de 5 años

El estudio de los periodos de retorno permite conocer cómo se comportará la inundación provocada por el huracán Otto en un futuro con una probabilidad asociada. La modelación para el periodo de retorno de 5 años para la zona de Cuipilapa es la modelación con el resultado con el menor impacto (ver Figura 5-25). Es importante resaltar que sigue existiendo una mancha de inundación considerable en la zona media y que el cauce presenta velocidades altas en la mayoría del cauce.

Se tienen velocidades máximas de casi 7.5 m/s en cauce, lo cual nos indica que el río es potencialmente peligroso independientemente del periodo de retorno y por lo tanto se debe de tener atención especial a este cauce. En los Apéndices se puede encontrar las imágenes con una mayor resolución a las figuras mostradas en el documento.

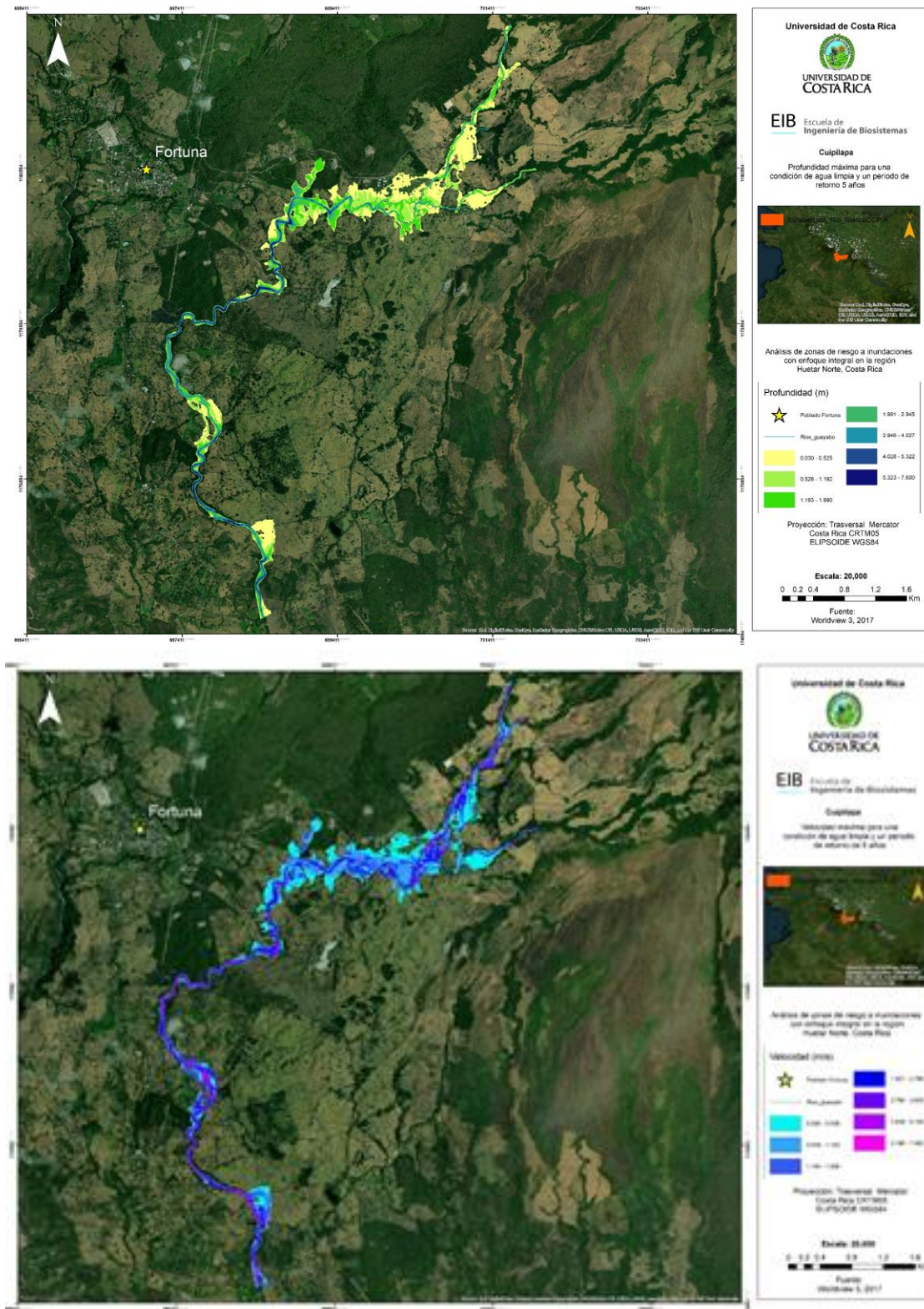


Figura 5-25 Profundidad y velocidad de agua para Cuipilapa con un periodo de retorno de 5 años.

5.6.3.2 Resultados para para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II y un periodo de retorno de 5 años

En el caso de Guayabo y Quebrada Hornillas para el periodo de retorno se tienen las condiciones con menor impacto en la zona (ver Figura 5-26). La mancha de inundación en la mayoría presenta una altura baja de 40cm con algunas zonas con velocidades considerables de hasta 1m/s. Estas velocidades se encuentran en zonas donde ocurrieron daños materiales, con la condición de que no impactaron directamente al poblado de Guayabo.

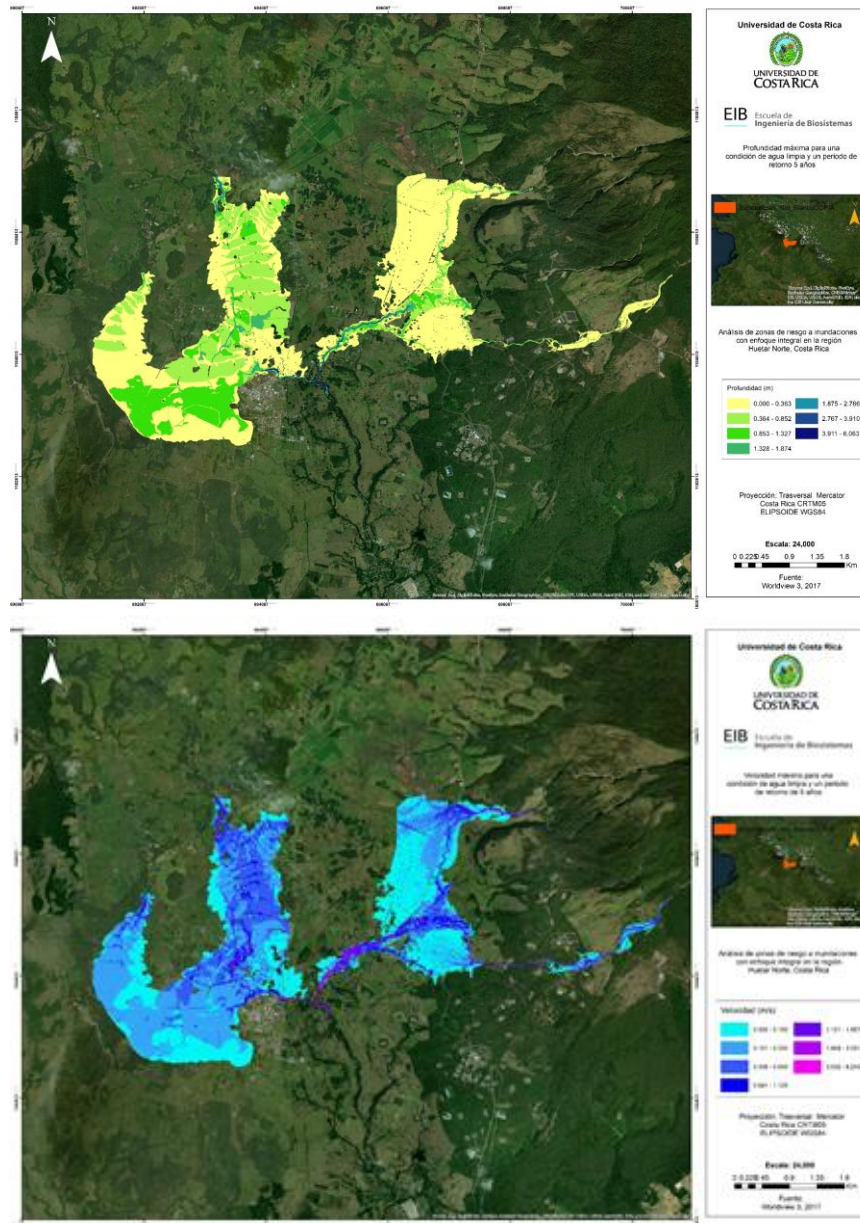


Figura 5-26 Profundidad y velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con un periodo de retorno de 5 años.

5.6.3.3 Resultados para para Cuipilapa con CN tipo II y un periodo de retorno de 10 años

A la modelación de Cuipilapa con el periodo de retorno de 10 años se le modificó las características de la malla (ver Figura 5-27), tomando en cuenta las nuevas condiciones y obteniendo un impacto mayor de la inundación. Este resultado sufre un aumento general de la mancha de agua y del impacto del evento extremo en la zona de estudio. Este aumento es leve y enfatiza la peligrosidad del cauce.

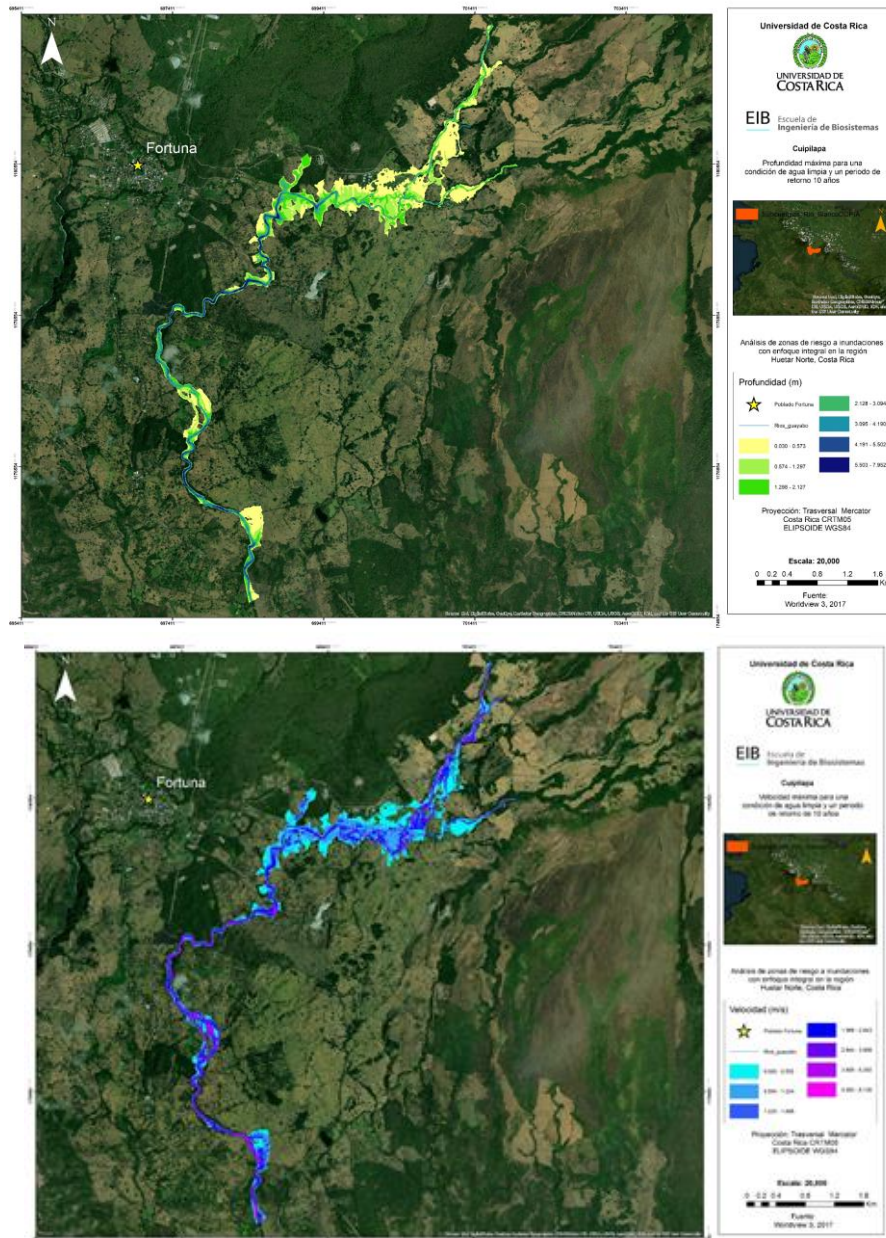


Figura 5-27 Profundidad y velocidad de agua para Cuipilapa con un periodo de retorno de 10 años.

5.6.3.4 Resultados para para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II y un periodo de retorno de 10 años

Para Guayabo y Quebrada Hornillas tenemos el mismo comportamiento con el modelo anterior, pero con la connotación de tener un impacto mayor (ver Figura 5-28). Pasamos de tener alturas de 0.46m a 0.53m en promedio de todo el modelo. Las zonas con peligrosidad aumentan y se tienen velocidades más peligrosas en cauce, llegando a tener valores máximos de 7m/s.

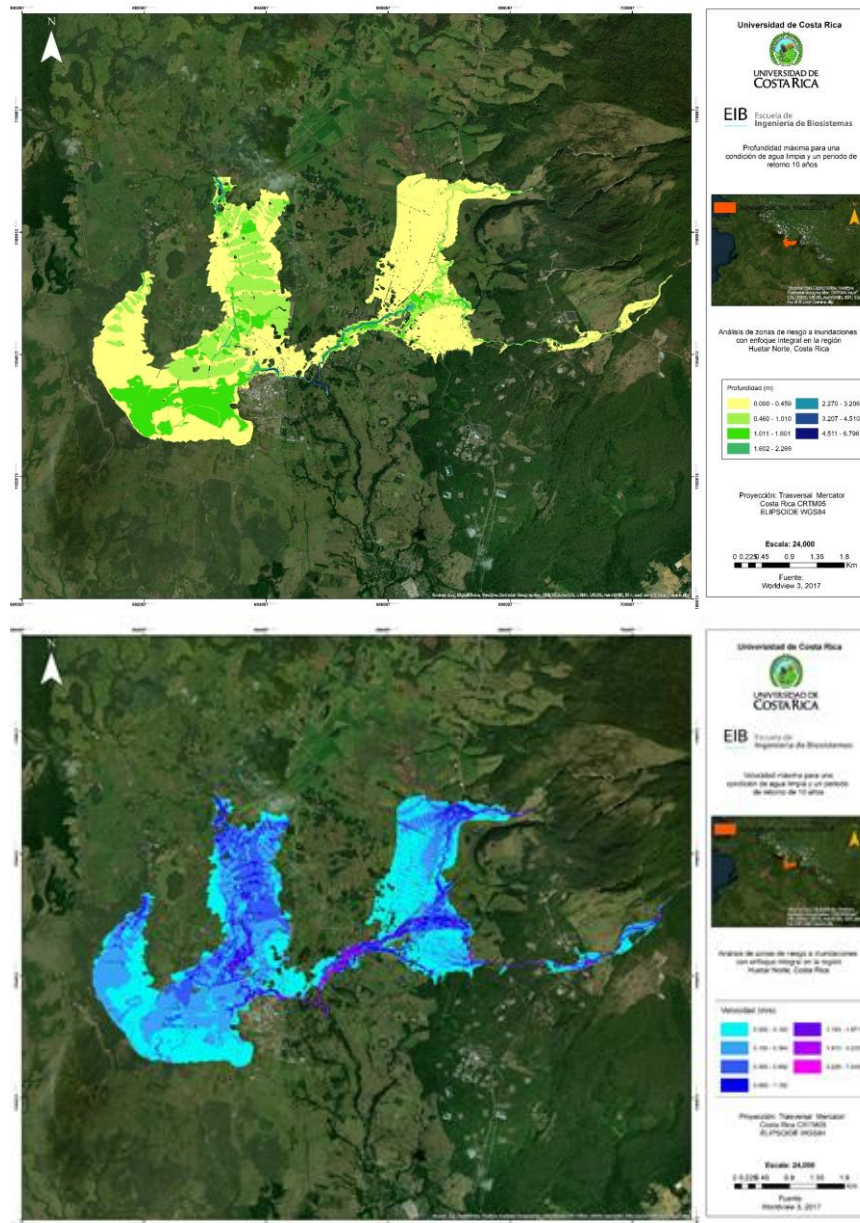


Figura 5-28 Profundidad y velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con un periodo de retorno de 10 años.

5.6.3.5 Resultados para para Cuipilapa con CN tipo II y un periodo de retorno de 25 años

Para el periodo de retorno de 25 años de Cuipilapa tenemos un aumento en la mancha de inundación incluso tomando en cuenta el modelo con CN tipo II (ver Figura 5-29). Esta mancha ya alcanza los 2.15km² y presenta profundidades promedio de 1.49m. En el caso de la velocidad se tiene valores máximos de 8.8m/s en cauce. La peligrosidad en general tiene un aumento significativo para este modelo.

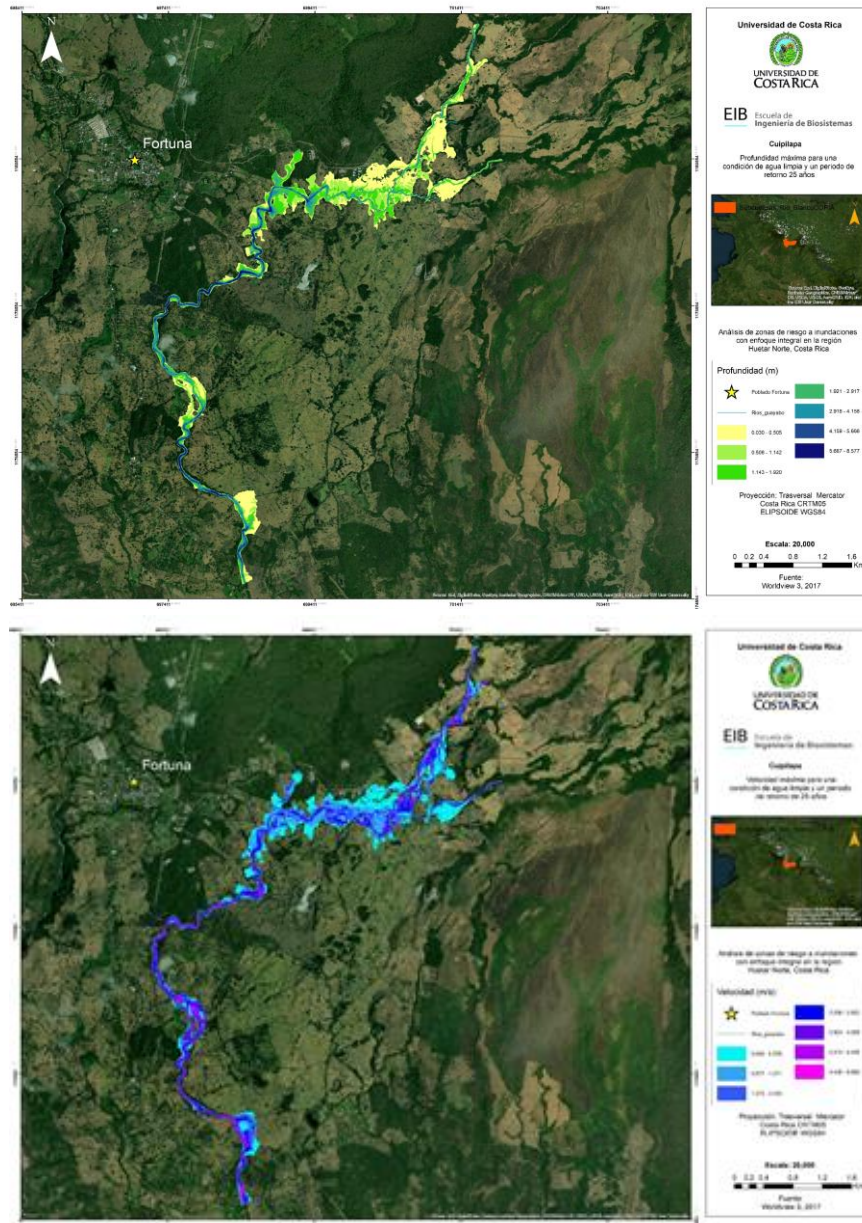


Figura 5-29 Profundidad y velocidad de agua para Cuipilapa con un periodo de retorno de 25 años.

5.6.3.6 Resultados para para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II y un periodo de retorno de 25 años

En este caso del modelo tenemos un aumento generalizado de la mancha de inundación teniendo un área de 11.11km² cubierta de agua (ver Figura 5-30). En promedio se tienen profundidades 0.60m y velocidades máximas de 7.6m/s. Es importante resaltar que las zonas con velocidades superiores a 1.3m/s tienen un aumento considerable, este efecto no solo en cause.

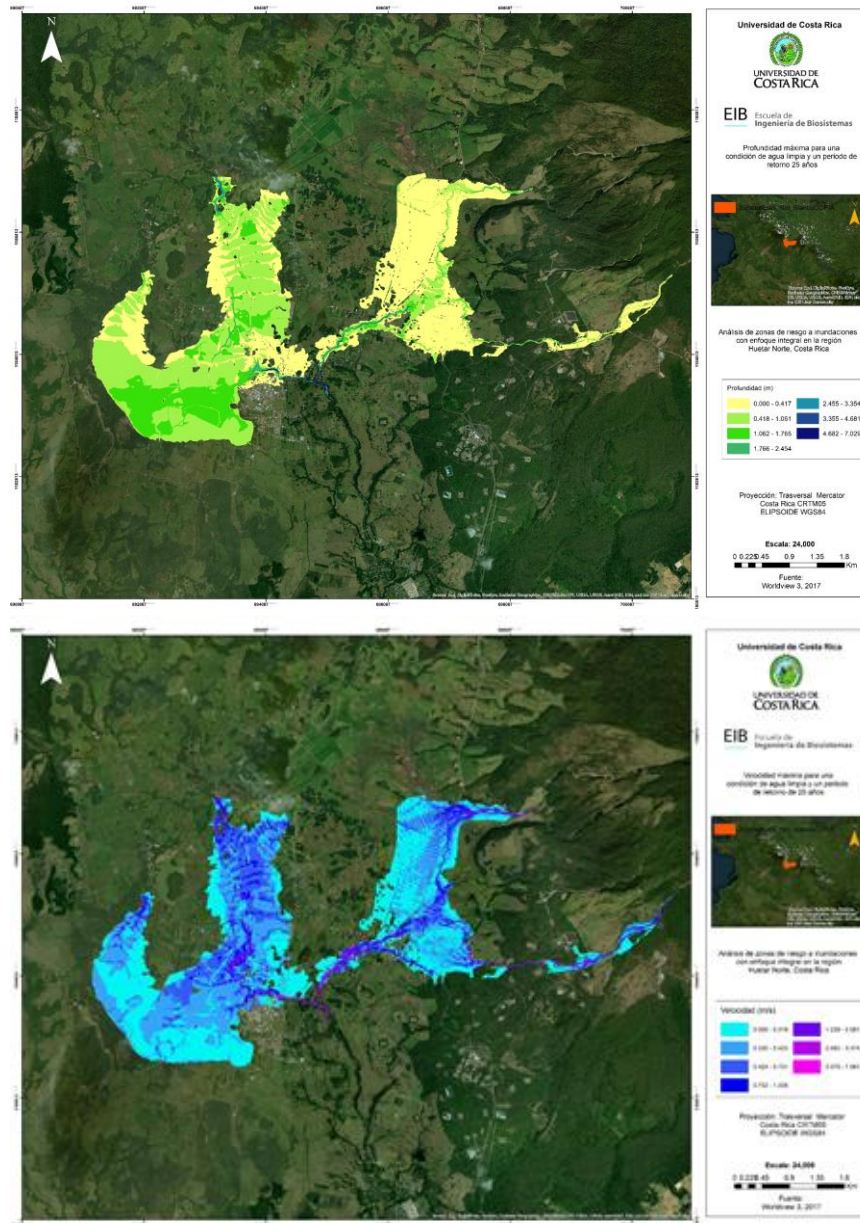


Figura 5-30 Profundidad y velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con un periodo de retorno de 25 años.

5.6.3.7 Resultados para para Cuipilapa con CN tipo II y un periodo de retorno de 50 años

Con un periodo de retorno de 50 años tenemos un escenario donde se tiene mayor impacto que el modelo con numero de curva tipo III (ver Figura 5-31), por lo que tenemos un escenario con una amplitud de hasta 2.30km² de mancha de inundación. En el caso de la velocidad tenemos un aumento generalizado en todo el cauce y alrededores, teniendo valores máximos de hasta 9.23m/s. Toda la zona cerca al cauce es una zona con un alto impacto de la inundación, provocando un escenario crítico.

La profundidad promedio es de 1.68m ubicado en el cauce, lo cual es un elemento por considerar en el caso de tener estructuras hidráulicas en el cauce. Al momento del estudio se contaba con un puente en la zona baja, el cual tiene la altura suficiente para evitar problemas a futuro.

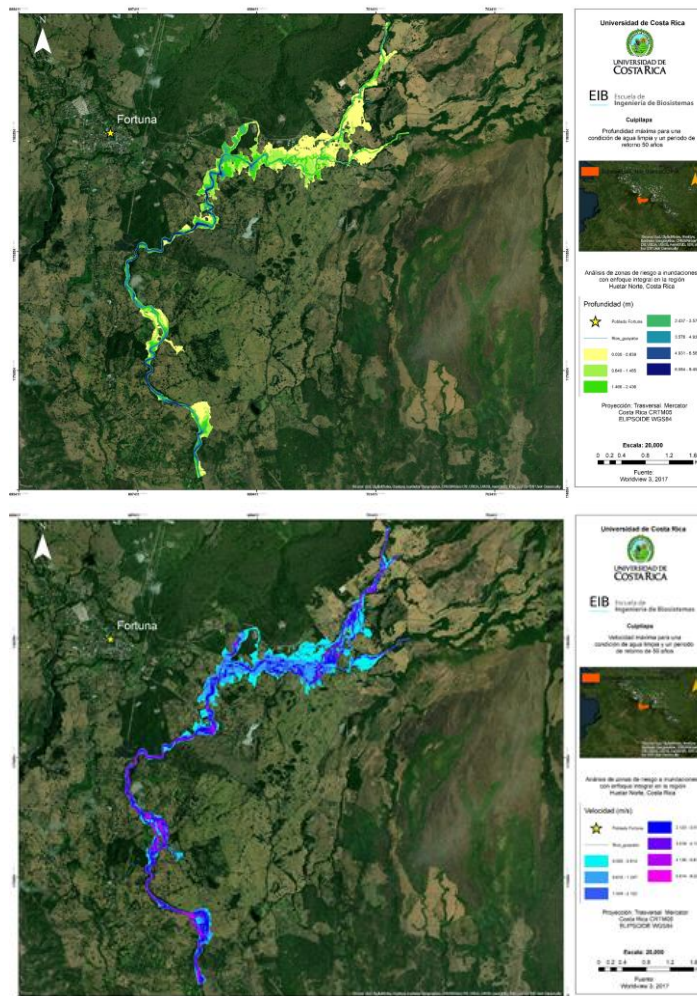


Figura 5-31 Profundidad y velocidad de agua para Cuipilapa con un periodo de retorno de 50 años.

5.6.3.8 Resultados para para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II y un periodo de retorno de 50 años

En Guayabo y Quebrada Hornillas tenemos un aumento general de la mancha de inundación, teniendo profundidades promedio de 0.68m. La velocidad máxima alcanza los 7.76m/s, lo cual no es un aumento considerable con el periodo de retorno anterior, la problemática viene en el aumento del área con velocidades elevadas. En la Figura 5-32 se observa como ocurre un efecto embudo desde Quebrada Hornillas hacia el poblado de Guayabo. Esta particularidad con este escenario aumenta la peligrosidad de toda la zona.

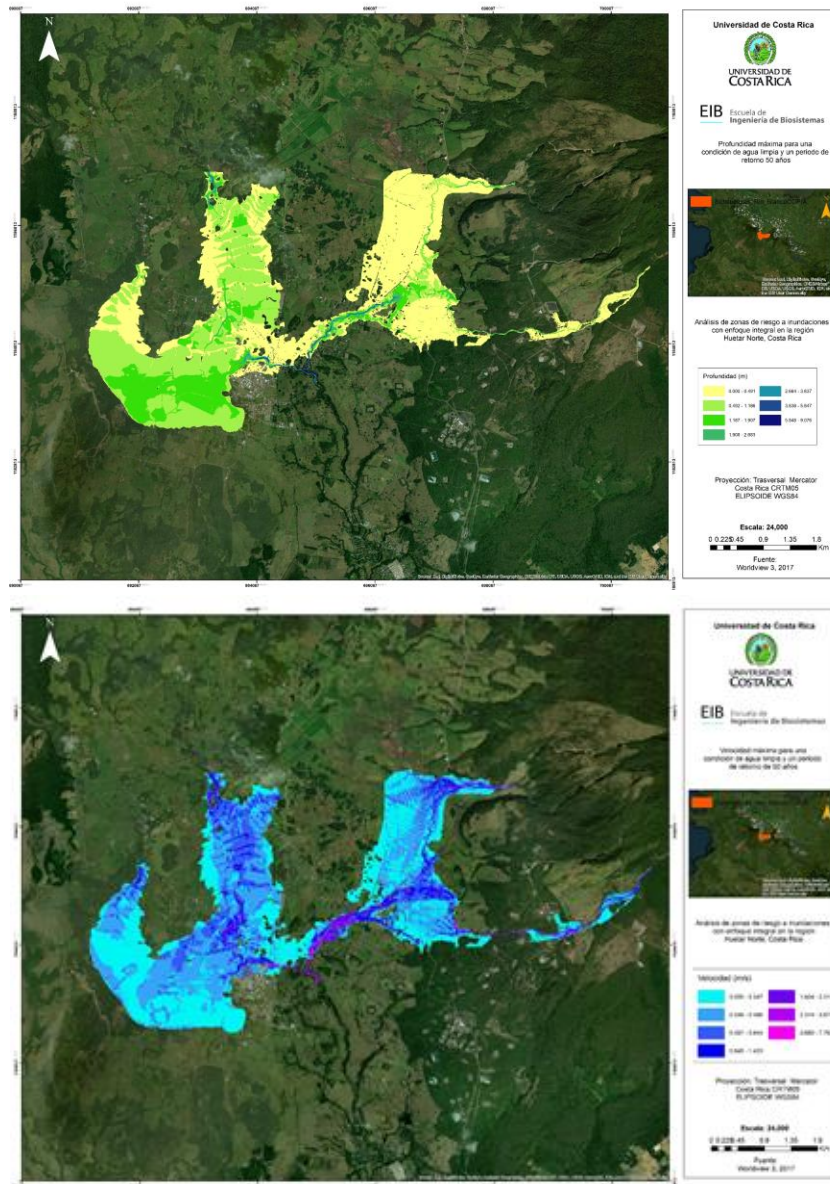


Figura 5-32 Profundidad y velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con un periodo de retorno de 50 años.

5.6.3.9 Resultados para para Cuipilapa con CN tipo II y un periodo de retorno de 100 años

Para el periodo de retorno de 100 años tenemos el escenario con mayor área de afectación y peligrosidad (ver Figura 5-33). La mancha de agua es de 2.44 km² y profundidades promedio de 1.80m. Todo el cauce presenta condiciones de alto impacto con velocidades elevadas por la pendiente y la topografía. Este escenario es el más crítico para esta zona, confirmando la peligrosidad del cauce principal.

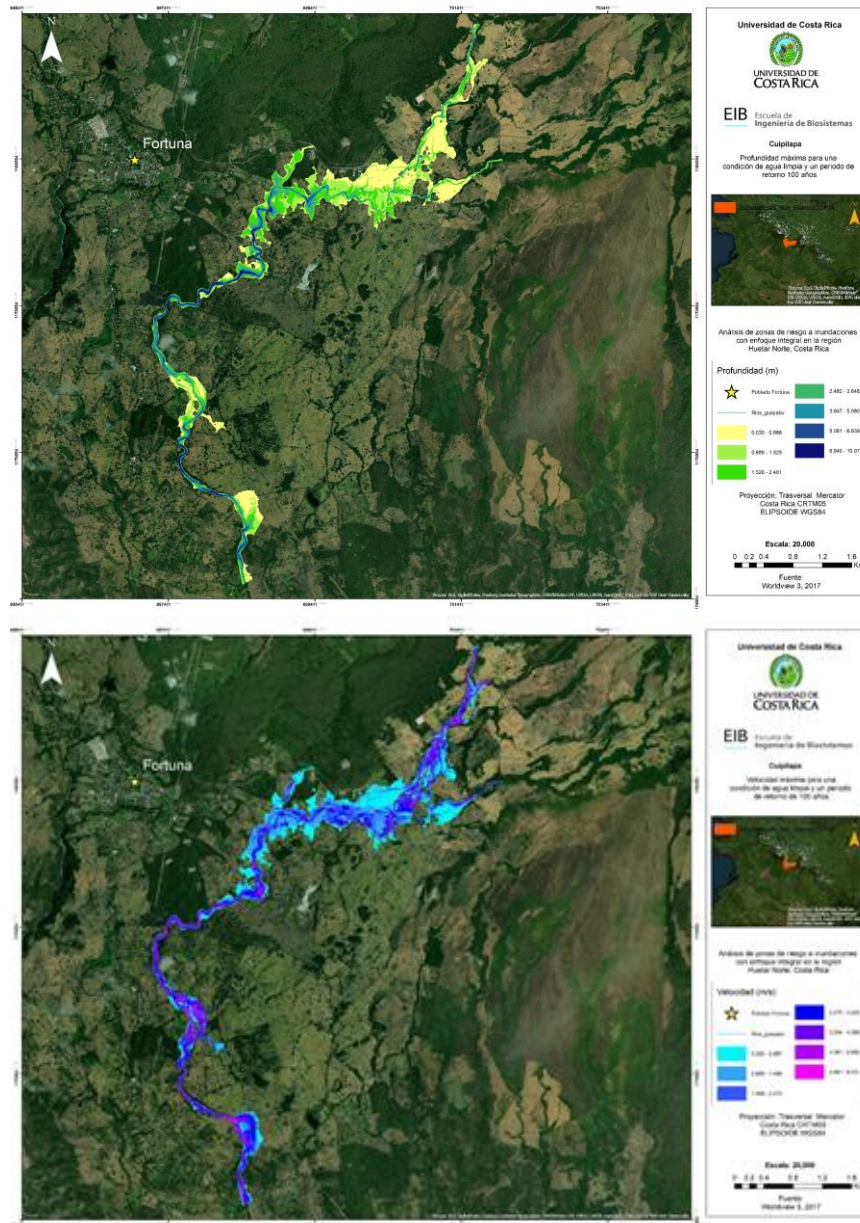


Figura 5-33 Profundidad y velocidad de agua para Cuipilapa con un periodo de retorno de 100 años

5.6.3.10 Resultados para para Guayabo y Quebrada Hornillas con CN tipo II y un periodo de retorno de 100 años.

Para el periodo de retorno de 100 años tenemos un escenario con una mancha de inundación de 11.50km² (ver Figura 5-34). Este no es el peor escenario para la zona de estudio, pero si se observa un impacto importante en los poblados cercanos. La velocidad amplia las zonas con valores altos, ocasionando tener varias regiones con velocidades mayores a 1.5m/s.

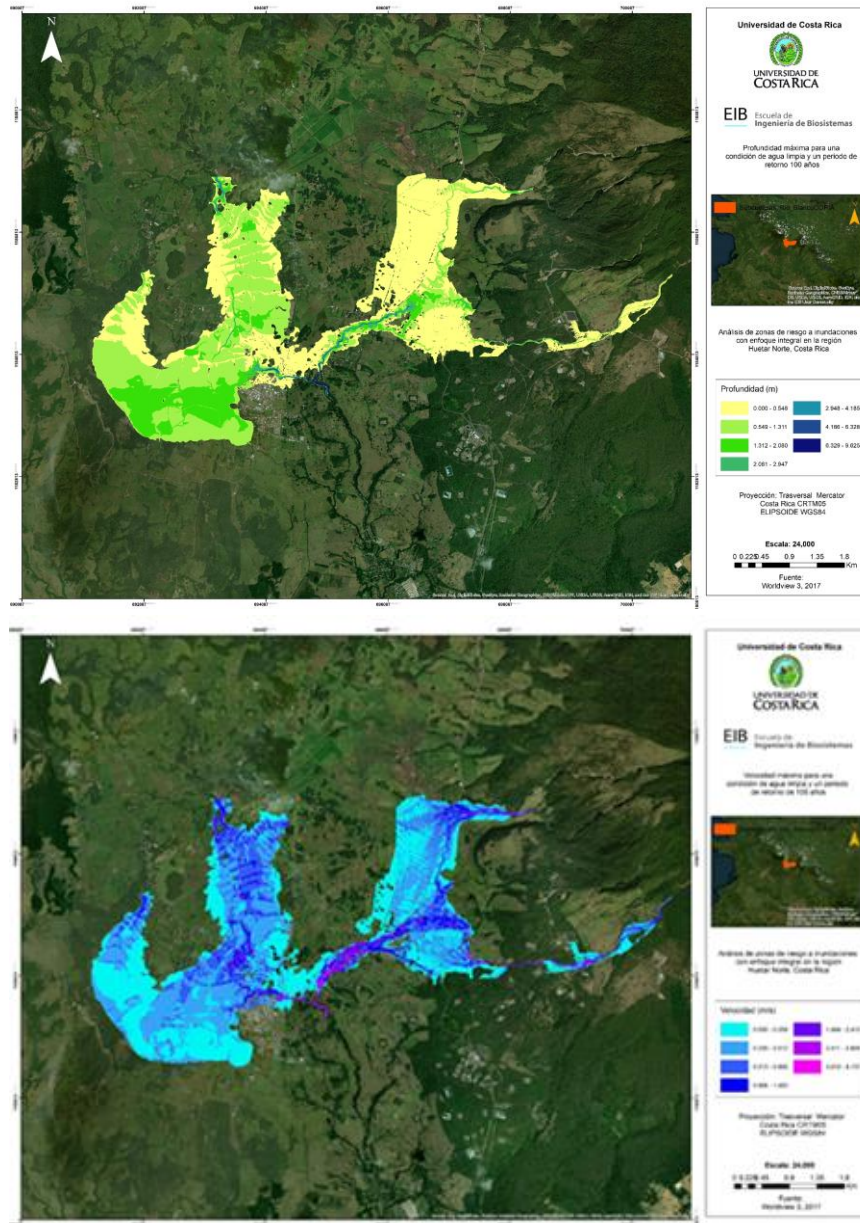


Figura 5-34 Profundidad y velocidad de agua para Guayabo y Quebrada Hornillas con un periodo de retorno de 100 años.

5.6.4 Análisis de continuidad en el modelo.

Para el modelo considerando un CN tipo II y agua limpia, se realizó un análisis de continuidad en diferentes zonas de la malla. Este estudio permite evaluar el comportamiento del paso del agua por el mallado. En la Figura 5-35 se puede observar las secciones seleccionadas a evaluar para la zona de Cuipilapa. Estos perfiles se escogen en base a la cercanía de entradas de agua del modelo, considerando una distancia mínima de 2km, debido a la zona de estabilización que ocupa el mismo.

Otros puntos de interés son la confluencia de más de una fuente de agua o zonas donde ocurren reducciones fuertes del área transversal para el paso de agua, ya que sirven como un embudo natural, aumentando las velocidades en estas regiones. En el Apéndice E se puede observar el mapa para Guayabo y Quebrada Hornillas.

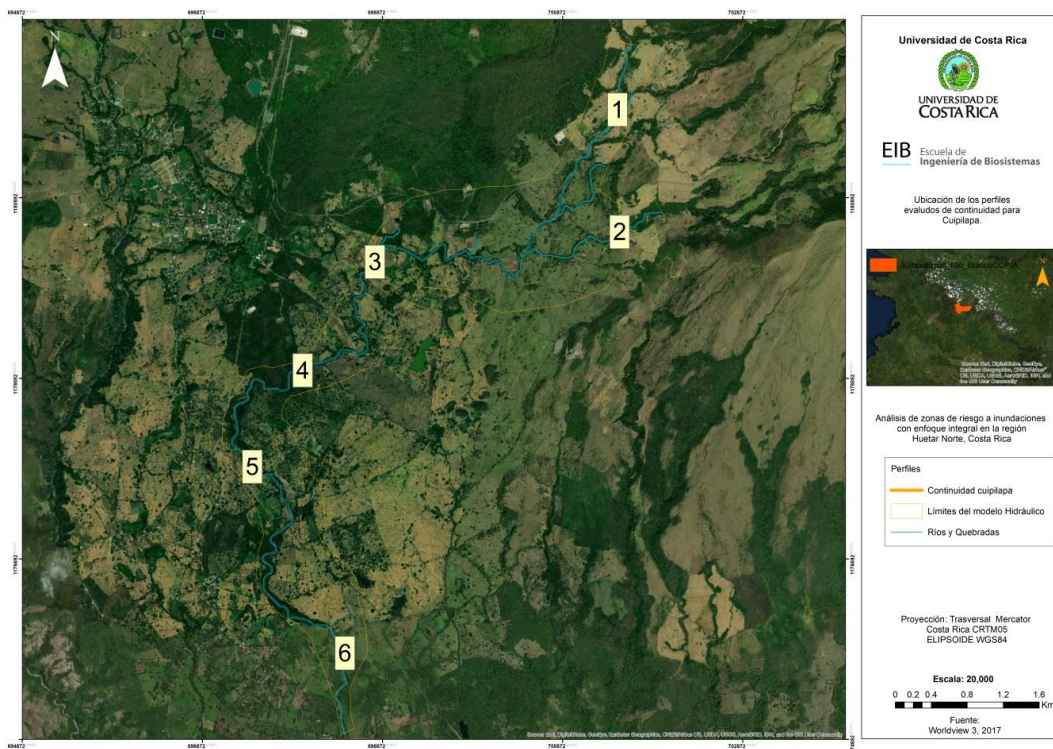


Figura 5-35 Ubicación de perfiles seleccionados para Cuipilapa.

En el perfil seleccionado vamos a encontrar un hidrograma de descargar (ver Figura 5-36), el cual deberá de tener un comportamiento parecido a los hidrogramas de entradas. La presencia de irregularidades es un indicador de un problema de continuidad en el mallado y un mal cálculo en los elementos de la zona. En el apéndice F se encuentran todos los perfiles evaluados.

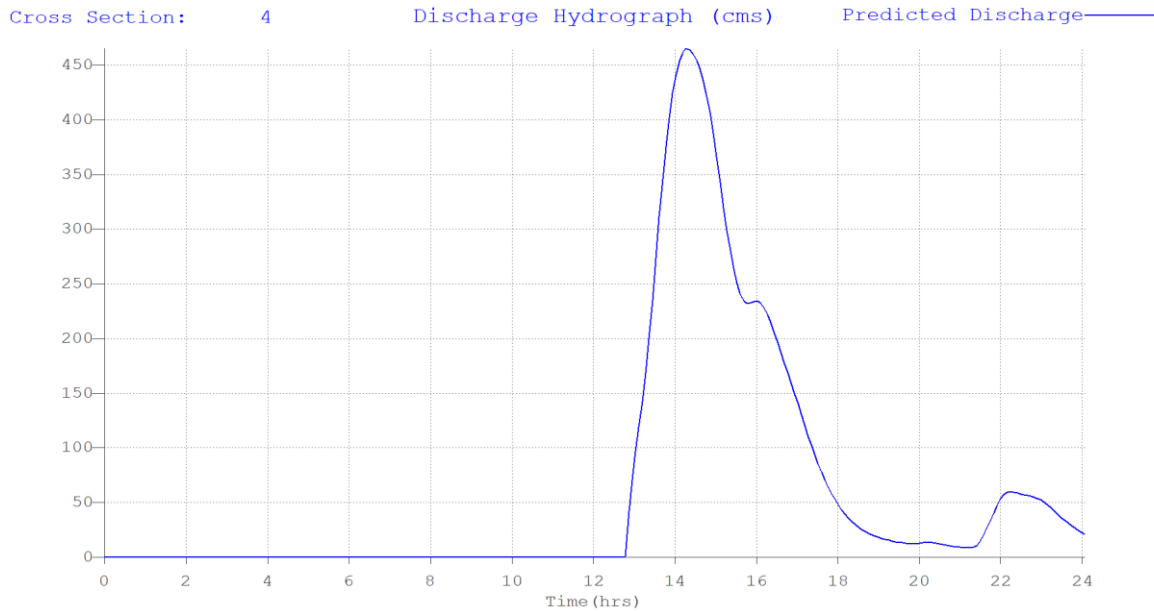


Figura 5-36 Perfil número 4 para el modelo de Cuipilapa.

5.6.5 Resumen de Análisis Hidráulicos.

A modo de resumen se procesaron los resultados generados por los modelos para tener un conocimiento más amplio sobre el comportamiento de la inundación en cada zona. En la Tabla 5-3 se puede observar el área de afectación para cada escenario evaluado para la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas. El modelo con mayor afectación es el que presenta un numero de curva de tipo III, este modelo es el que considera el mayor volumen de agua y tomando en cuenta la topografía plana, se esperaba que este modelo tuviera la mayor área de afectación. Los resultados muestran que el evento para esta zona es superior a un periodo de retorno de 100 años, lo cual confirma el impacto que tuvo la población debido al evento extremo.

Tabla 5-3 Área de afectación por escenario estudiado para la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas.

Escenario	Área de inundación (km ²)
Periodo de Retorno 5 años	10.58
Periodo de Retorno 10 años	10.9
Periodo de Retorno 25 años	11.11
Periodo de Retorno 50 años	11.36
Periodo de Retorno 100 años	11.50
Huracán Otto CN II	11.68
Huracán Otto CN II CV	11.86
Huracán Otto CN III	12.12

En el caso del índice de amenaza (ver Tabla 5-4) se puede observar la distribución de afectación para esta zona. En este predomina el valor medio debido a la topografía y la forma del cauce de la zona baja, ya que la zona es una planicie que sirve como medio para contener la inundación y reducir la velocidad del cauce. Es importante recordar que el índice de amenaza considera la profundidad y velocidad de la inundación, por lo cual zonas con profundidades grandes no necesariamente tienen índices de amenaza altos.

De igual manera zonas con altas velocidades y profundidades bajas se pueden considerar zonas de amenaza altas. En el caso de los resultados de Cuipilapa se pueden observar en el Apéndice D.

Tabla 5-4 Área de afectación por índice de amenaza para la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas.

Escenario	Área de amenaza (km ²)		
	Baja	Media	Alta
Periodo de Retorno 5 años	1.28	2.95	0.27
Periodo de Retorno 10 años	1.50	3.43	0.37
Periodo de Retorno 25 años	1.40	4.05	1.46
Periodo de Retorno 50 años	1.51	4.33	1.67
Periodo de Retorno 100 años	1.52	4.59	1.79
Huracán Otto CN II	1.35	4.67	1.86
Huracán Otto CN II CV	1.49	4.16	1.54
Huracán Otto CN III	1.19	5.36	2.54

El comportamiento de la profundidad promedio es un reflejo de los modelos en general. Tenemos los valores más elevados para el escenario con CN tipo II y flujo de lodos (ver Tabla 5-5), ya que al considerar esta condición, aumenta considerablemente el nivel de agua. La presencia de piedras, troncos, lodo y otros materiales, en una sección del río donde no hubo una variación de esta, genera como resultado este tipo de comportamientos.

Esto es contrario al área de afectación, debido a que las presencias de estos elementos sirven para aumentar el volumen de agua en algunas secciones del cauce. Los resultados para el Cuipilapa se encuentran en el Apéndice D.

Tabla 5-5 Estadísticas de los modelos para profundidad de inundación en la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas.

Escenario	Profundidad promedio (m)	Desviación Estándar (m)
Periodo de Retorno 5 años	0.46	0.47
Periodo de Retorno 10 años	0.53	0.52
Periodo de Retorno 25 años	0.60	0.56
Periodo de Retorno 50 años	0.68	0.63
Periodo de Retorno 100 años	0.74	0.68
Huracán Otto CN II	0.79	0.72
Huracán Otto CN II CV	0.80	0.72
Huracán Otto CN III	1.02	0.80

El área de afectación para la zona de Cuipilapa (ver Tabla 5-6) presenta un comportamiento diferente al modelo anterior. El escenario con mayor área es el periodo de retorno de 100 años y un modelo con numero de curva tipo II con flujo de lodos se encuentra entre el periodo de retorno de 50 y 100 años. Este comportamiento se puede deber a las características del cauce, ya que una gran sección es angosta y gran profundidad.

Las características particulares de la topografía muestran un modelo que tiene un comportamiento tipo embudo, donde pasamos de una sección amplia a una muy angosta. Esto aumenta considerablemente la velocidad y las profundidades de inundación. Toda esta zona es de especial atención por el peligro que conlleva. Esta zona tiene poblados cercanos al cauce, pero no se vieron afectados debido a que el cauce es profundo.

Tabla 5-6 Área de afectación por escenario estudiado para la zona de Cuipilapa.

Escenario	Área de inundación(km²)
Periodo de Retorno 5 años	1.94
Periodo de Retorno 10 años	1.96
Huracán Otto y CN II	2.09
Periodo de Retorno 25 años	2.15
Huracán Otto y CN III	2.29
Periodo de Retorno 50 años	2.30
Huracán Otto, CN II y CV	2.42
Periodo de Retorno 100 años	2.44

6 Conclusiones

En el presente estudio al realizar el análisis hidrológico e hidráulico de las zonas amenazadas por inundaciones y deslizamientos se puede concluir lo siguiente:

- Se determinaron las características geomorfológicas, suelos y cobertura vegetal de las cuencas del río Guayabo, Quebrada Hornillas y Cuipilapa que drenan al cantón de Bagaces haciendo uso de información satelital y topográfica de alta resolución lo cual facilitó y mejoró la información base necesaria para este tipo de análisis.
- Según el análisis de lluvia, se obtuvo que para el evento del Huracán Otto la cuenca del Río Guayabo presentó un acumulado máximo de 236.2 mm en 24 horas y las estaciones de Casa de Máquinas Miravalles de 299 mm, La Fortuna 224.81 mm y Pozo 29 un total de 225.3 mm para el 26 de noviembre del 2016, sin embargo se determina que la mayoría del evento se sitúa en un lapso de 12 horas.
- El área de drenaje para la cuenca del río Guayabo es de 52.84 km² y para la de Cuipilapa 49.76 km², y con el modelo de elevación digital a una resolución de 1 metro, se obtuvo una división de subcuencas, con la cual se obtuvo 21 subcuencas para Guayabo y 8 para Cuipilapa.
- Se delimitaron las zonas potenciales de inundación a partir de datos recolectados en campo y con la delimitación topográfica de alta resolución.
- La inundación en la zona de Cuipilapa afecta varias zonas en la parte alta, mientras el daño en la zona baja se concentra en el cauce principal, ocasionando daño severo en obras hidráulicas.
- La Laguna Mogote funciona como superficie de reducción de impacto, ya que funciona como un amortiguador de los excesos en los niveles de agua, evitando un daño mayor en la población de Guayabo.
- La población de Guayabo se ve parcialmente afectado por los niveles de inundación, ubicando el mayor problema en la zona norte del mismo y su cauce principal.
- Los modelos que consideran flujo de lodos son la condición más crítica, se tiene un aumento en promedio de 1m de altura de agua y velocidades más peligrosas. Estos al considerar la presencia de rocas, árboles, lodo y otros objetos, se pueden considerar los modelos más acordes a la situación real de la zona cuando existen deslizamientos en las zonas montañosas y arrastre de material.
- Debido a la topografía de la zona de Quebrada Hornillas y Guayabo, la zona baja del modelo es una región de peligro inminente. La construcción de obras de cualquier tipo, son un aspecto que se debe limitar para esta ubicación en particular y debería de considerar las altas velocidades para evitar la socavación de la infraestructura.

7 Referencias

- Comité Sectorial Regional Agropecuario. (2011). Plan Regional de Desarrollo Región Huetar Norte.
- INTA-MAG. (2016). Boletín Técnico Suelos de Costa Rica, Orden Andisol. San José.
- INTA-MAG. (2016). Boletín Técnico Suelos de Costa Rica, Orden Entisol.
- INTA-MAG. (2016). Boletín Técnico Suelos de Costa Rica, Orden Ultisol. San José.
- Pérez, J. (1979). Fundamentos del ciclo hidrológico. Universidad Central de Venezuela, Departamento de Meteorología e Hidrología, Caracas.
- Rojas, N. (s.f.). Estudio de Cuencas Hidrográficas de Costa Rica, Cuenca del Zapote. San José: IMN.
- Villalobos, R., Jiménez, E., Hernández, K., Córdoba, J., & Solano, P. (2013). Descripción del clima en el cantón de Upala. San José: IMN.
- Villón Bejár, M. (.2006). Drenaje. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- González, M. (Abril de 2001). *OpenCourseWare de la Universidad Politécnica de Madrid*. Recuperado el 22 de Setiembre de 2018, de <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/hidrologia-de-superficies-y-conservacion-de-suelos/ocw-marta-pdf/Tema2.pdf>
- MAG. (2014). *Principales suelos de Costa Rica*. Obtenido de Asociación Costarricense de Ciencias del Suelo: http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/suelos-cr.html
- Pérez J. 1979. Fundamentos del ciclo hidrológico. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas-Venezuela. 1-38.*
- Strahler, A. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Trans American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.
- United States Department of Agriculture. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds: Technical Release 55* (Segunda ed.). Estados Unidos.
- Villón Bejár, M. (2006). *Drenaje*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

8 Equipo de trabajo

A continuación, se mencionan las personas que participaron en el grupo de trabajo para la elaboración del informe y ejecución de las simulaciones.

Nombre	Título	Posición
Alejandra Rojas González, Ph.D.	Licenciatura en Ingeniería Agrícola Maestría en Ingeniería Civil. Doctorado en Ingeniería Civil (Recursos Hídricos y Ambiental)	Coordinadora
Ing. Reiner Sibaja Matarrita	Licenciatura en Ingeniería Agrícola.	Colaborador, por medio de FundaciónUCR
Ing. Sebastián Fallas Salazar	Licenciatura Ingeniería Agrícola y de Biosistemas	Colaborador, por medio de FundaciónUCR

9 Apéndices

<i>Apéndice A: Anotaciones de campo del GPS.</i>	<i>9-2</i>
<i>Apéndice B: Descripción visual de las estructuras hidráulicas de la zona.</i>	<i>9-8</i>
<i>Apéndice C: Estructuras hidráulicas en formato dwg.</i>	<i>9-19</i>
<i>Apéndice D: Resumen de análisis Hidráulico para Guayabo y Quebrada Hornillas.</i>	<i>9-23</i>
<i>Apéndice E: Ubicación de los perfiles de continuidad para cada modelo.</i>	<i>9-26</i>
<i>Apéndice F: Perfiles de continuidad para cada modelo.</i>	<i>9-29</i>
<i>Apéndice G: Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Cuipilapa para distintos escenarios 9-38</i>	
<i>Apéndice H: Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Guayabo para distintos escenarios. 9-63</i>	

Apéndices del Informe Técnico:
Zonas de amenaza por inundación en Quebrada Hornillas,
Río Guayabo y Río Cuipilapa usando sensores remotos,
análisis hidrológico e hidráulico

Proyecto de Investigación N°340-B7-522 -21
Universidad de Costa Rica



Preparado para:

*Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de
Emergencias*

Elaborado por:

Alejandra M. Rojas González, Ph.D.

Escuela de Ingeniería de Biosistemas, UCR.

Fecha: 30 de agosto, 2023

9 Apéndice

<i>Apéndice A: Anotaciones de campo del GPS.</i>	<i>9-2</i>
<i>Apéndice B: Descripción visual de las estructuras hidráulicas de la zona.</i>	<i>9-8</i>
<i>Apéndice C: Estructuras hidráulicas en formato dwg.....</i>	<i>9-19</i>
<i>Apéndice D: Resumen de análisis Hidráulico para Guayabo y Quebrada Hornillas.</i>	<i>9-23</i>
<i>Apéndice E: Ubicación de los perfiles de continuidad para cada modelo.</i>	<i>9-26</i>
<i>Apéndice F: Perfiles de continuidad para cada modelo.</i>	<i>9-29</i>
<i>Apéndice G. Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Cuipilapa para distintos escenarios</i>	<i>9-38</i>
<i>Apéndice H. Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Guayabo para distintos escenarios.....</i>	<i>9-63</i>

Apéndice A: Anotaciones de campo del GPS.

Apuntes de gira realizada a la Cuenca Guayabo y Cuipilapa

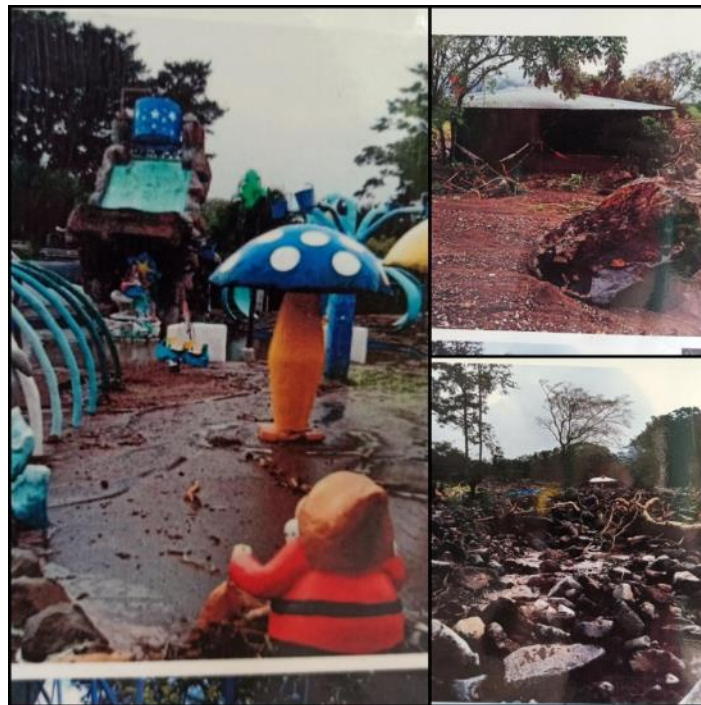


Figura 9-1 Fotos en el museo de Termomanía del impacto del Huracán Otto en la zona.



Figura 9-2 Cauce del río Hornillas en Thermomania



Figura 9-3 Parte plana en Guayabo, cercano a la laguna Mogote.



Figura 9-4 Casa entre Guayabo y Pueblo Nuevo donde el huracán Otto inundó 10 cm cerca del río Guayabo



Figura 9-5 Cauce del río Guayabo que inunda la zona mostrada en la Figura 2-4



Figura 9-6 Casa ubicada en la zona alta del río Guayabo donde el agua llevo a 40 cm de altura en el huracán Otto



Figura 9-7 Barrio el Congo donde se inundó a 10 cm de altura en el huracán Otto



Figura 9-8 Imágenes de la Q. Hornillas aguas arriba y aguas abajo cercano a Colinas del Miravalles



Figura 9-9 Puente ubicado sobre la Q. Hornillas a las residencias del ICE



Figura 9-10 Zona donde los habitantes de Guayabo indican que llegó la inundación.

Apéndice B: Descripción visual de las estructuras hidráulicas de la zona.



Figura 9-11. Puente en la parte baja del modelo de Cuipilapa, fotos tomadas aguas abajo del puente.



Figura 9-12 Superficie de rodaje del puente en la zona baja de Cuipilapa



Figura 9-13 Puente en la zona media del modelo de Cuipilapa, fotos tomadas aguas abajo del puente.



Figura 9-14 Superficie de rodaje del puente ubicado en la zona media de la cuenca del río Cuipilapa



Figura 9-15 Alcantarilla en la parte alta del modelo de Cuipilapia, fotos tomadas aguas debajo de la estructura.



Figura 9-16 Vertedero a la salida del centro turístico Thermomanía y estructura en cauce.



Figura 9-17 Vertedero en el río Hornillas en Termomanía



Figura 9-18 Alcantarilla ubicada en zona alta antes de Termomanía.



Figura 9-19 Alcantarilla en cauce de Quebrada Hornillas en la zona alta.



Figura 9-20 Alcantarilla en cauce de Quebrada Hornillas.

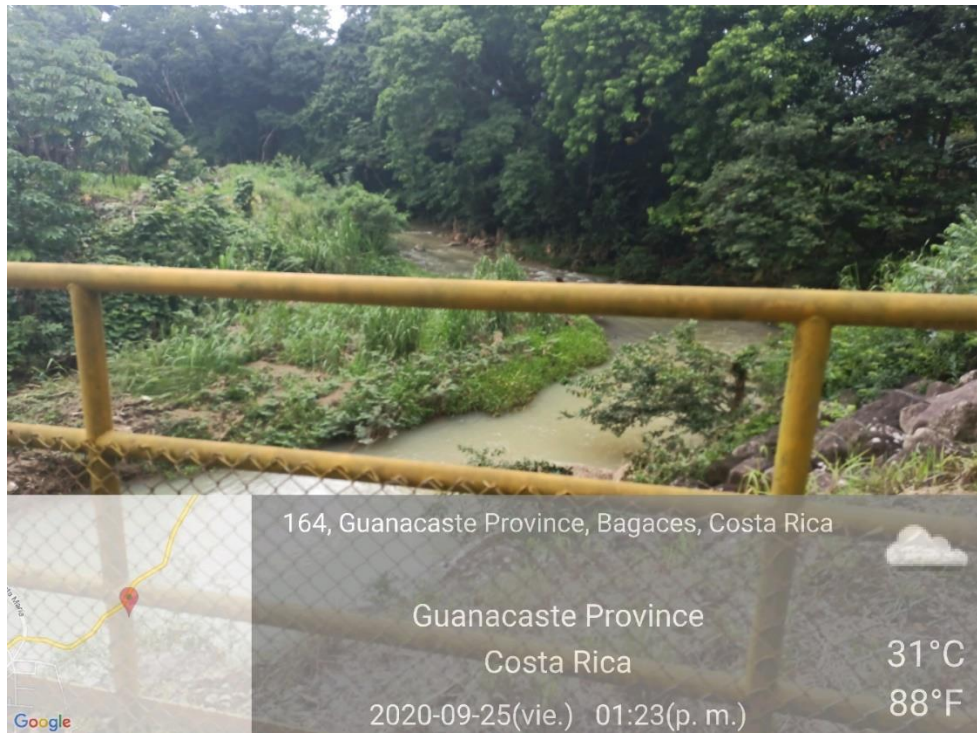


Figura 9-21 Puente cercano al poblado de Guayabo.

Apéndice C: Estructuras hidráulicas en formato dwg.

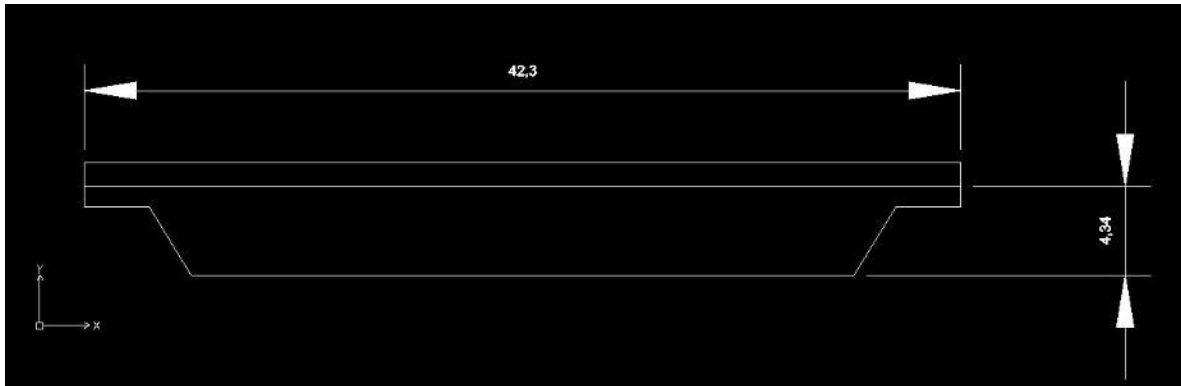


Figura 9-22 Perfil del puente en la parte baja del modelo de Cuipilapa

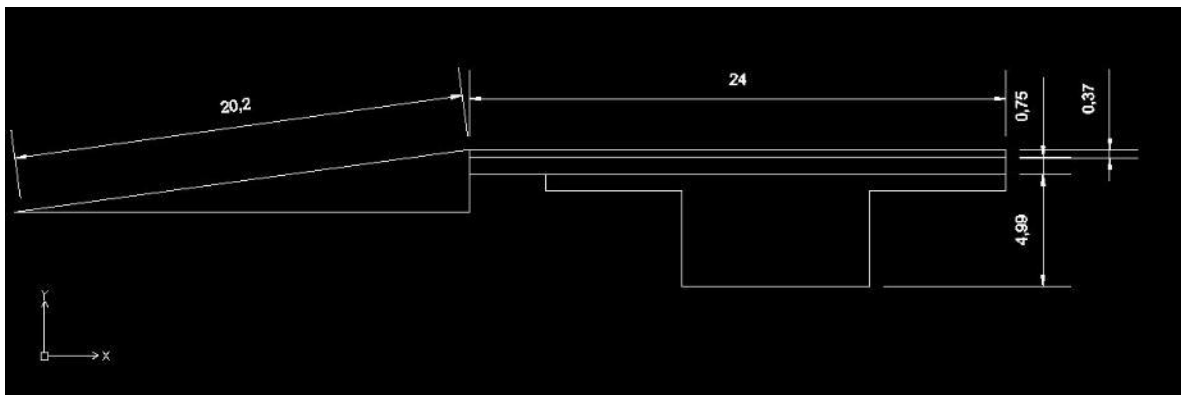


Figura 9-23 Perfil del puente en la parte media del modelo de Cuipilapa

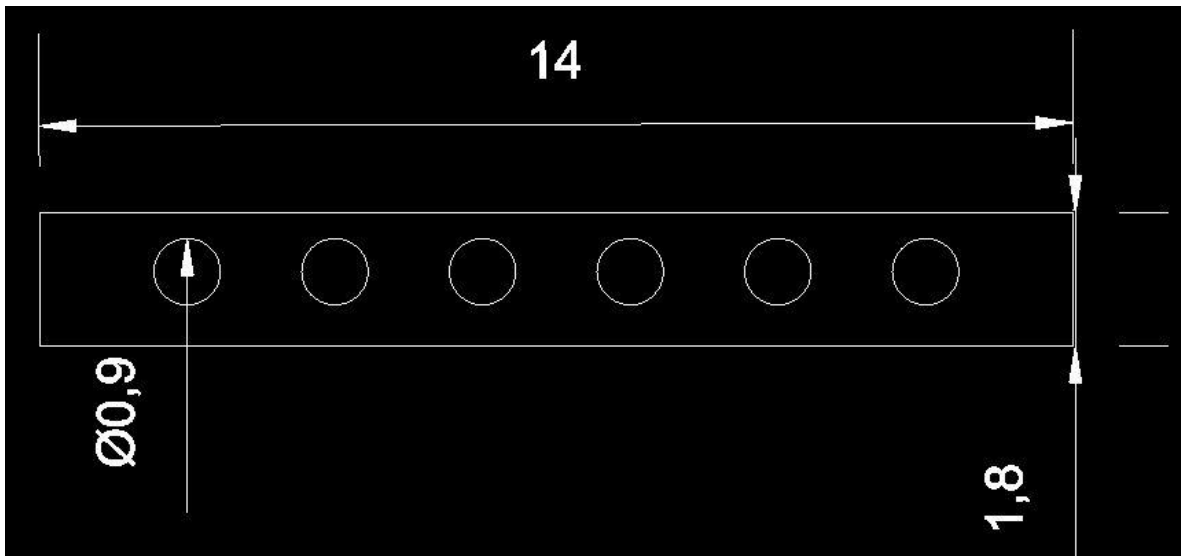


Figura 9-24 Perfil de alcantarilla en la parte alta del modelo de Cuipilapa, fotos tomadas aguas debajo de la estructura.

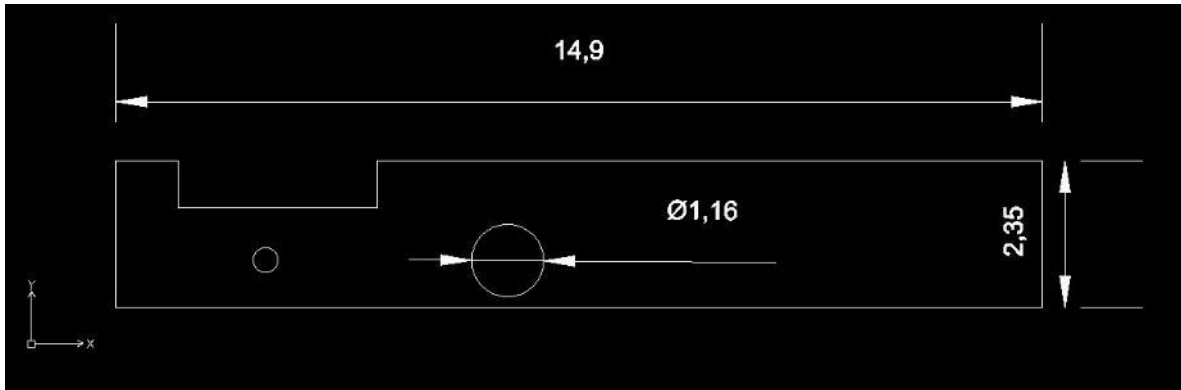


Figura 9-25 Perfil de vertedero a la salida del centro turístico Termomanía y estructura en cauce

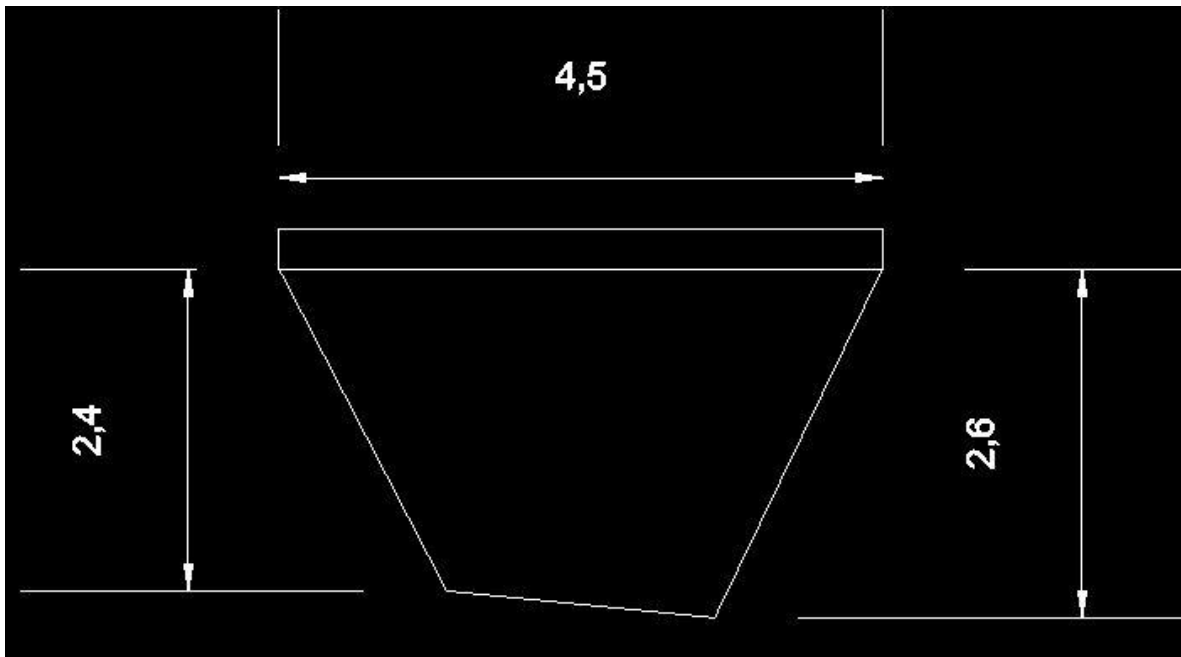


Figura 9-26 Perfil de puente pequeño en Termomanía

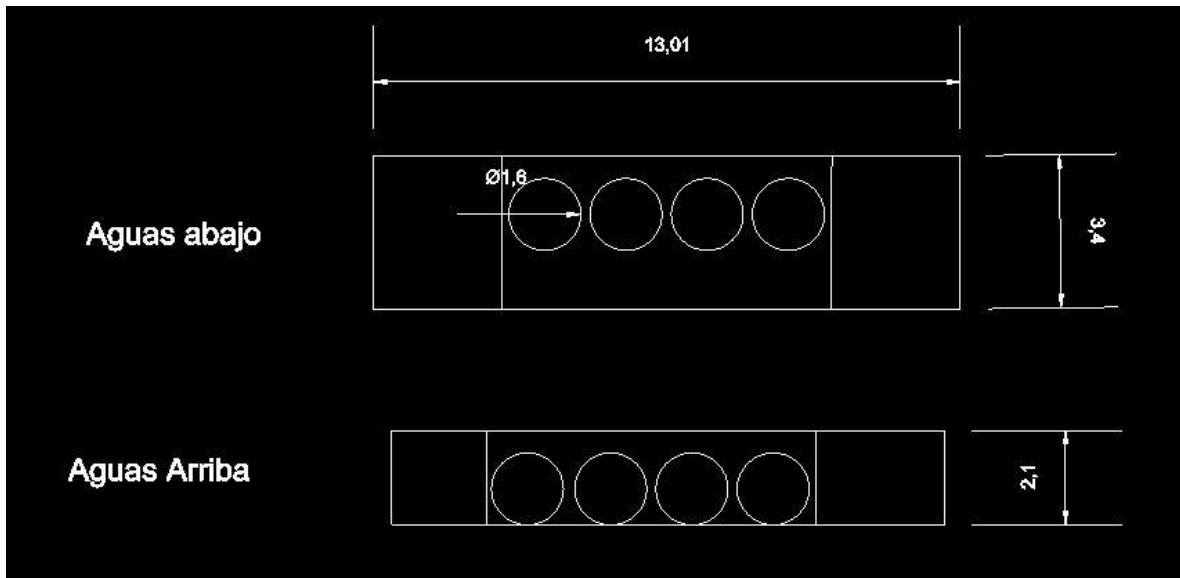


Figura 9-27 Perfil de alcantarilla ubicada en zona alta antes de Termomanía.

Apéndice D: Resumen de análisis Hidráulico para Guayabo y Quebrada
Hornillas.

Tabla 9-1 Área de afectación por escenario estudiado para la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas.

Escenario	Área de inundación(km2)
Periodo de Retorno 5 años	10.58
Periodo de Retorno 10 años	10.9
Periodo de Retorno 25 años	11.11
Periodo de Retorno 50 años	11.36
Periodo de Retorno 100 años	11.50
OTTO CN II	11.68
OTTO CN II CV	11.86
OTTO CN III	12.12

Tabla 9-2 Área de afectación por índice de amenaza para la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas.

Escenario	Área de amenaza (km2)		
	Baja	Media	Alta
Periodo de Retorno 5 años	1.28	2.95	0.27
Periodo de Retorno 10 años	1.50	3.43	0.37
Periodo de Retorno 25 años	1.40	4.05	1.46
Periodo de Retorno 50 años	1.51	4.33	1.67
Periodo de Retorno 100 años	1.52	4.59	1.79
OTTO CN II	1.35	4.67	1.86
OTTO CN II CV	1.49	4.16	1.54
OTTO CN III	1.19	5.36	2.54

Tabla 9-3 Estadísticas de los modelos para profundidad de inundación en la zona de Guayabo y Quebrada Hornillas.

Escenario	Profundidad promedio (m)	Desviación Estándar
Periodo de Retorno 5 años	0.46	0.47
Periodo de Retorno 10 años	0.53	0.52
Periodo de Retorno 25 años	0.60	0.56
Periodo de Retorno 50 años	0.68	0.63
Periodo de Retorno 100 años	0.74	0.68
OTTO CN II	0.79	0.72
OTTO CN III	0.80	0.72
OTTO CN II CV	1.02	0.80

Tabla 9-4 Área de afectación por escenario estudiado para la zona de Cuipilapa.

Escenario	Área de inundación(km2)
Periodo de Retorno 5 años	1.94
Periodo de Retorno 10 años	1.96
OTTO CN II	2.09
Periodo de Retorno 25 años	2.15
OTTO CN III	2.29
Periodo de Retorno 50 años	2.30
OTTO CN II CV	2.42
Periodo de Retorno 100 años	2.44

Tabla 9-5 Área de afectación por índice de amenaza para la zona de Cuipilapa.

Escenario	Área de amenaza (km2)		
	Baja	Media	Alta
Periodo de Retorno 5 años	0.21	0.49	0.84
Periodo de Retorno 10 años	0.21	0.49	0.87
Periodo de Retorno 25 años	0.21	0.52	1.00
Periodo de Retorno 50 años	0.20	0.52	1.20
Periodo de Retorno 100 años	0.22	0.44	1.43
OTTO CN II	0.22	0.51	0.90
OTTO CN III	0.22	0.52	1.14
OTTO CN II CV	0.19	0.44	1.58

Tabla 9-6 Estadísticas de los modelos para profundidad de inundación en la zona de Cuipilapa.

Escenario	Profundidad promedio (m)	Desviación Estándar
Periodo de Retorno 5 años	1.37	1.48
Periodo de Retorno 10 años	1.38	1.45
OTTO CN II	1.42	1.48
Periodo de Retorno 25 años	1.49	1.56
OTTO CN III	1.55	1.62
Periodo de Retorno 50 años	1.68	1.74
Periodo de Retorno 100 años	1.80	1.80
OTTO CN II CV	2.11	1.91

Apéndice E: Ubicación de los perfiles de continuidad para cada modelo.

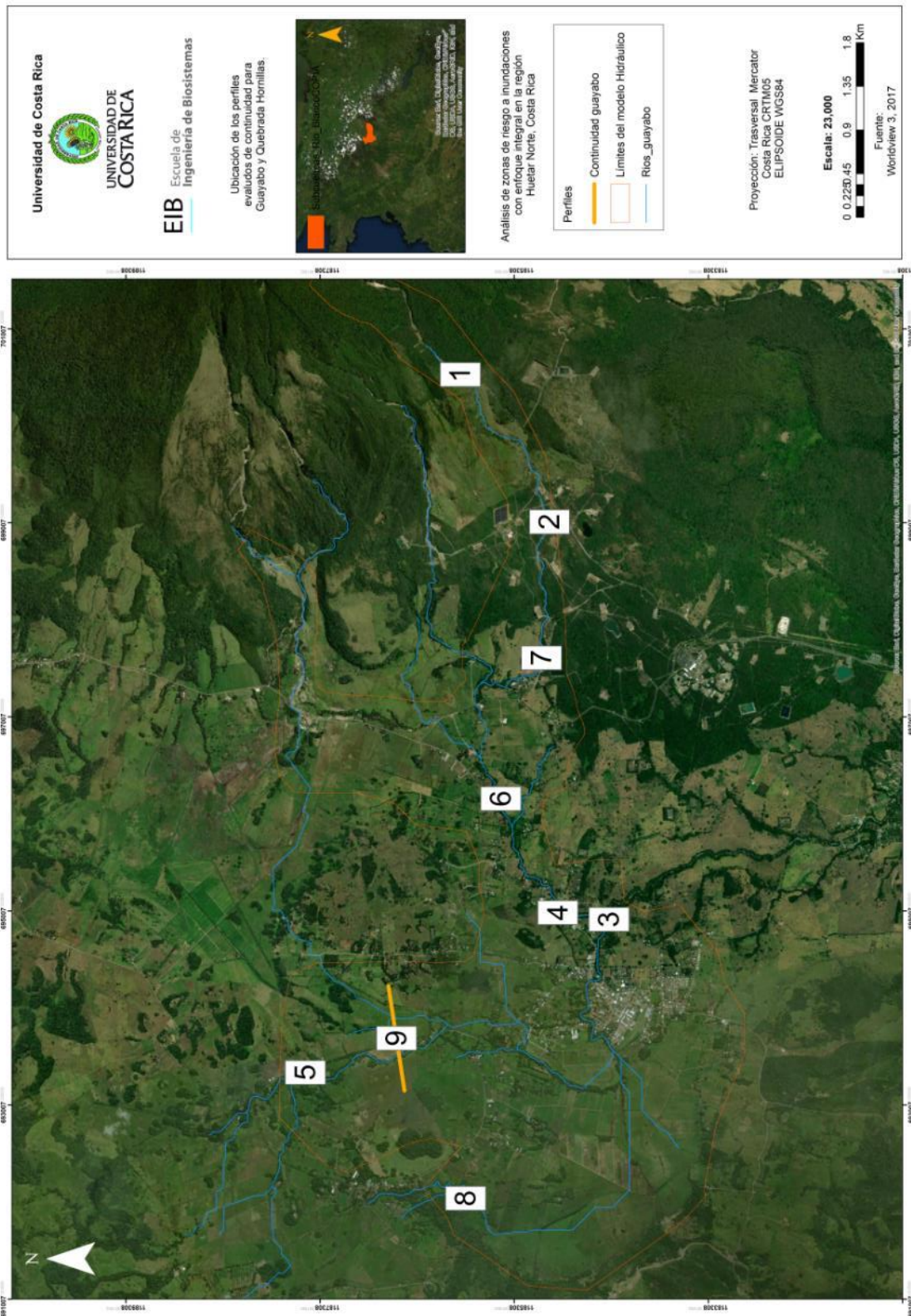


Figura 9-29 Ubicación de perfiles seleccionados para Guayabo y Quebrada Hornillas.

Apéndice F: Perfiles de continuidad para cada modelo.

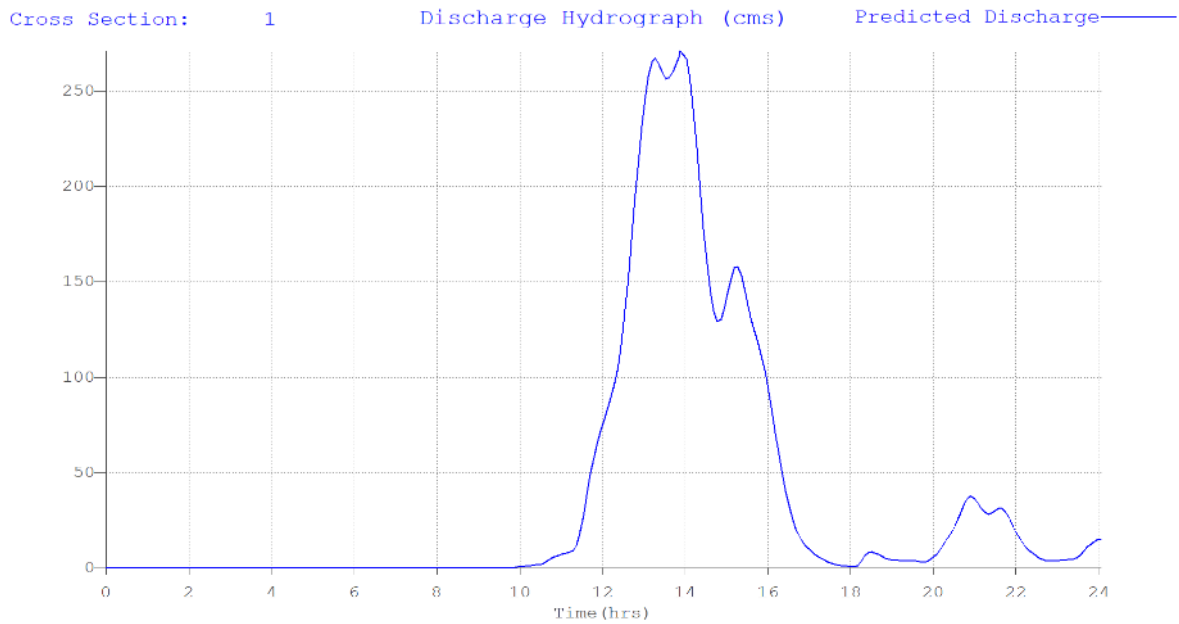


Figura 9-30 Continuidad evaluada en el perfil 1 para Cuipilapa

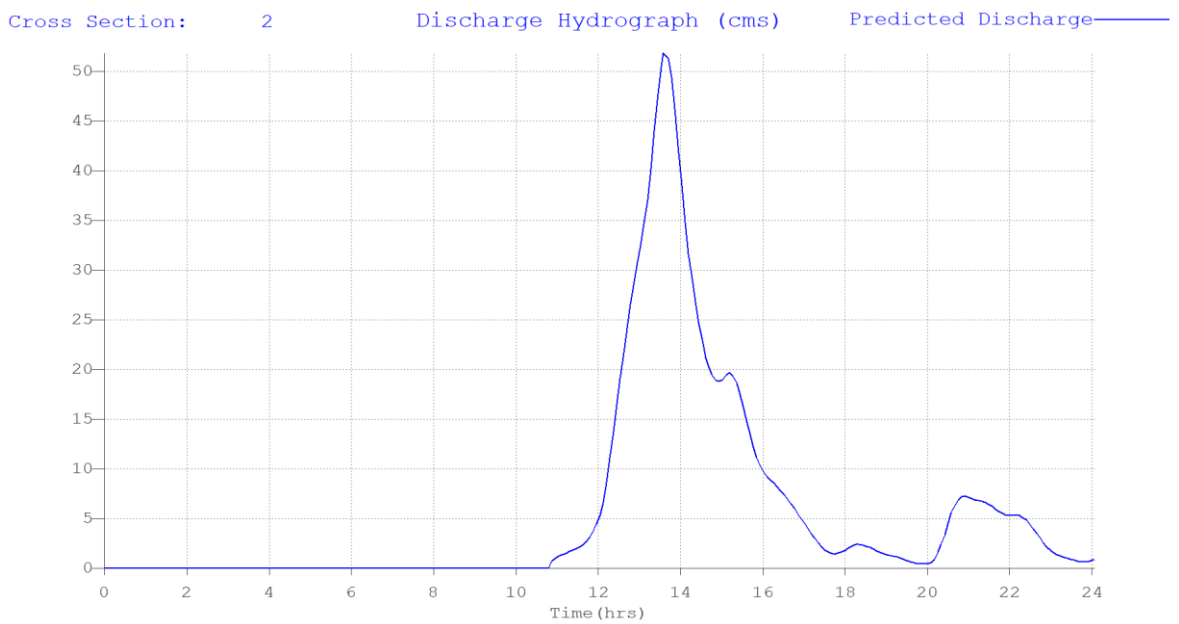


Figura 9-31 Continuidad evaluada en el perfil 2 para Cuipilapa

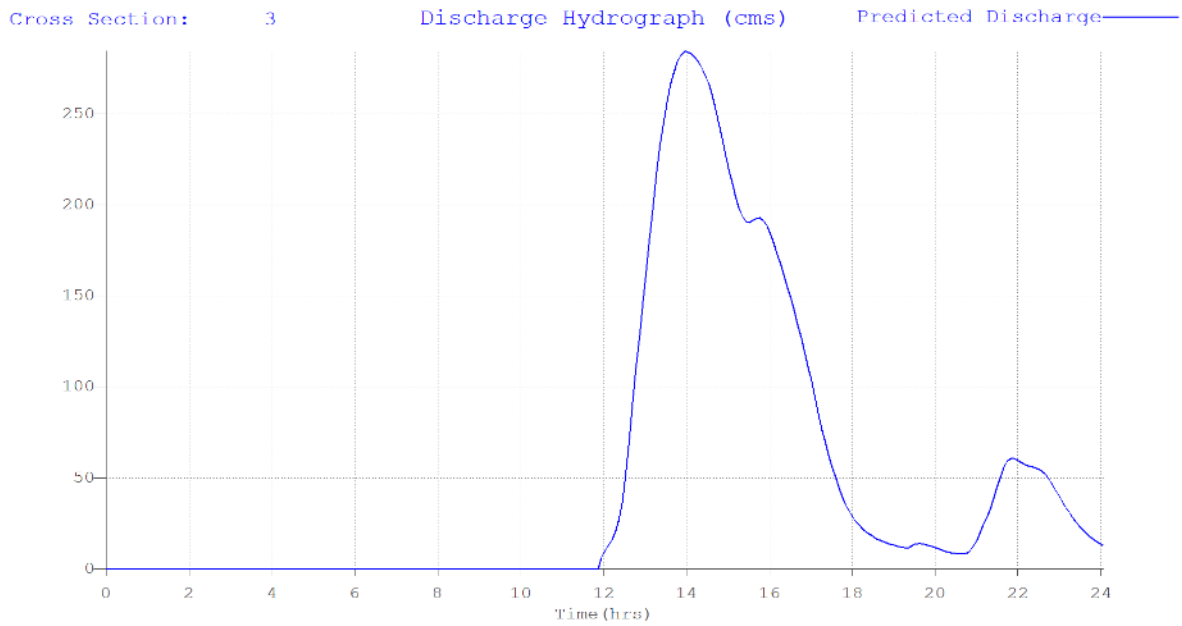


Figura 9-32 Continuidad evaluada en el perfil 3 para Cuipilapa

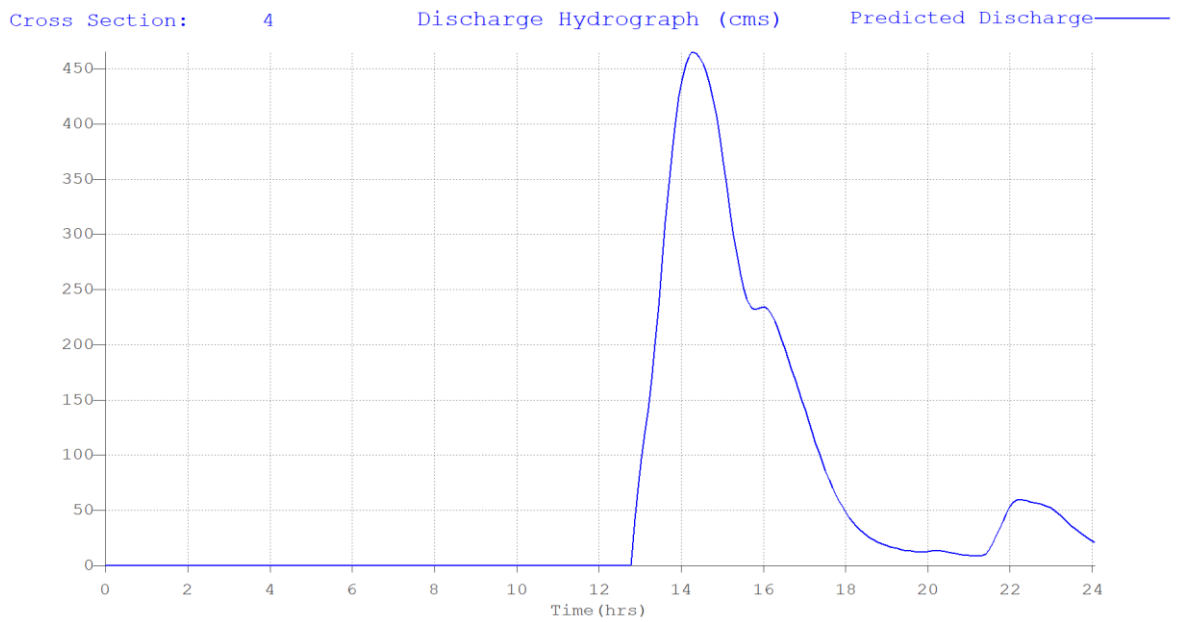


Figura 9-33 Continuidad evaluada en el perfil 4 para Cuipilapa

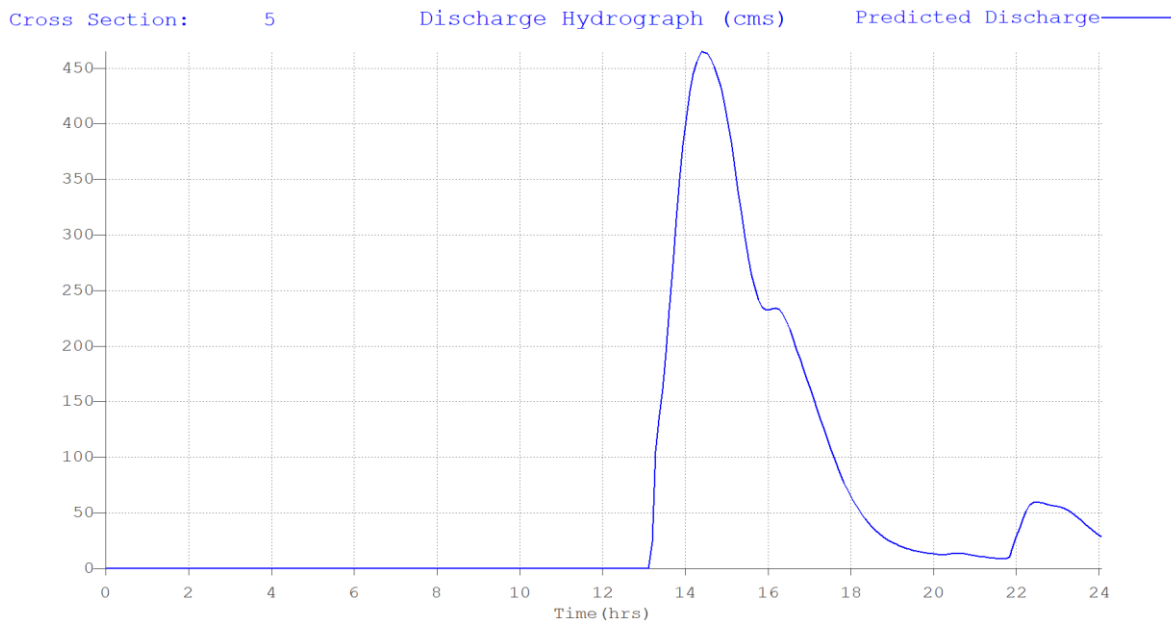


Figura 9-34 Continuidad evaluada en el perfil 5 para Cuipilapa

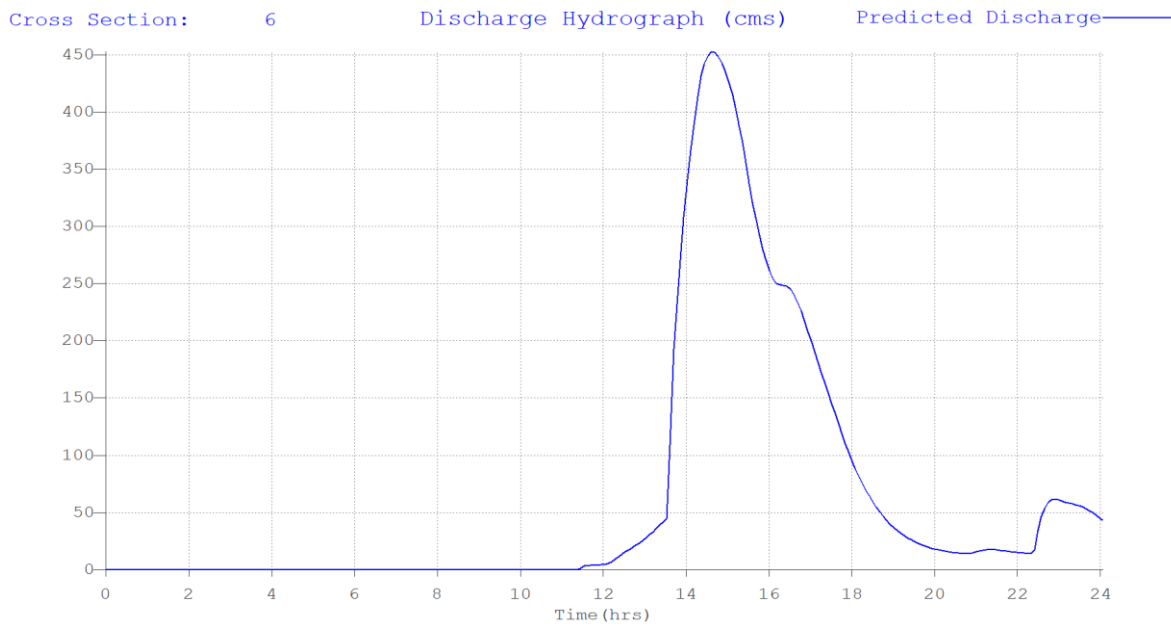


Figura 9-35 Continuidad evaluada en el perfil 6 para Cuipilapa

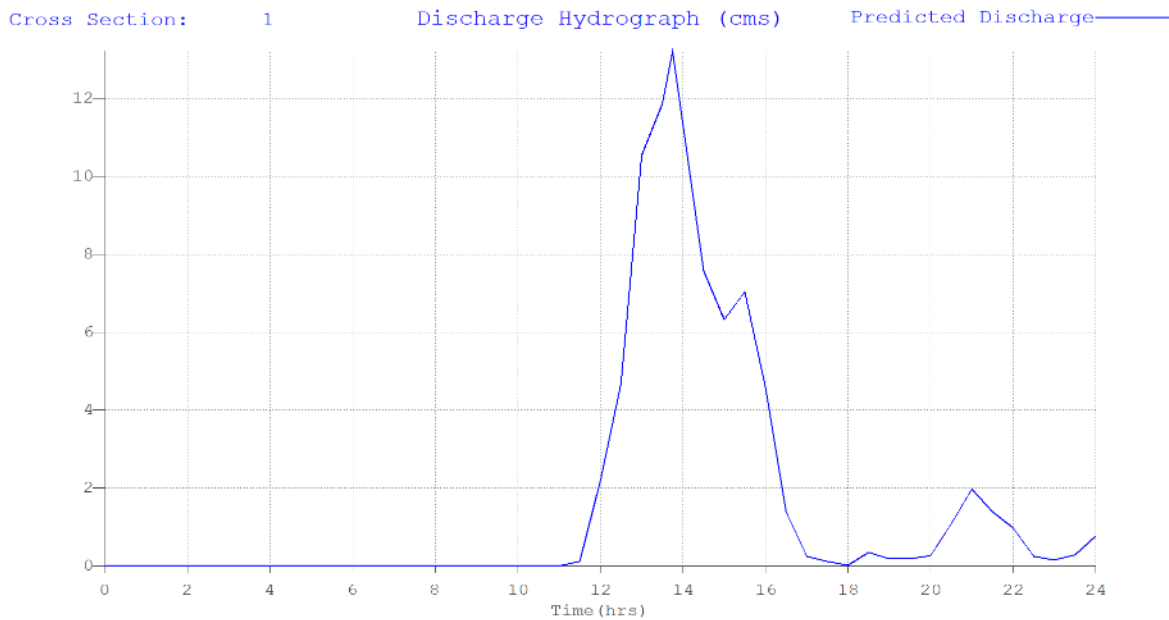


Figura 9-36 Continuidad evaluada en el perfil 1 para Guayabo u y Quebrada Hornillas.

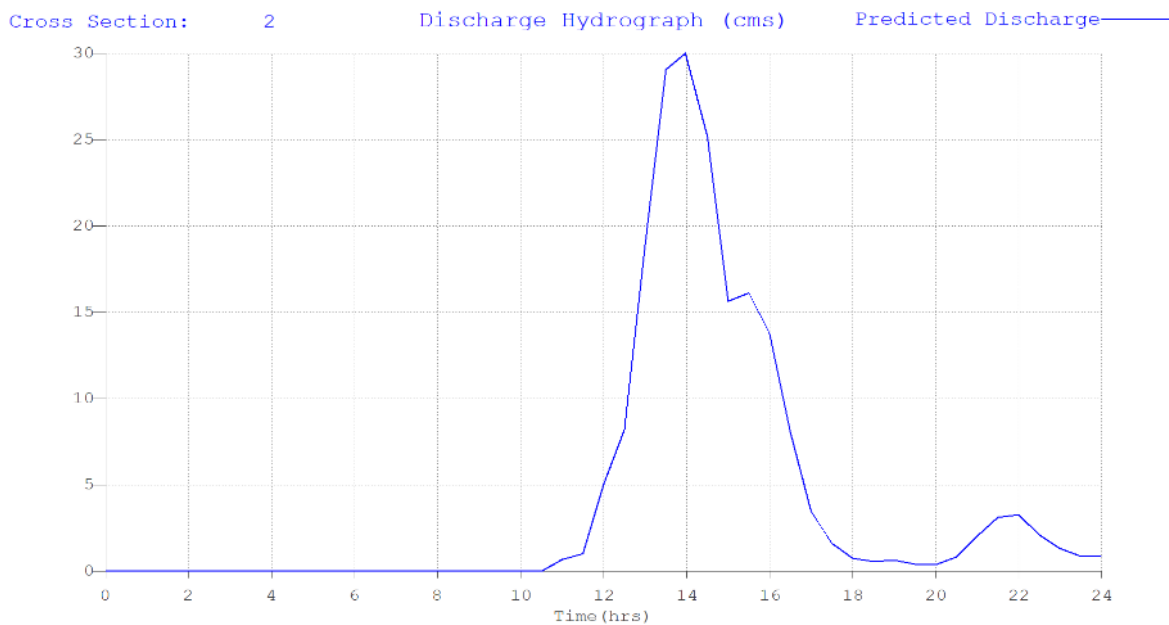


Figura 9-37 Continuidad evaluada en el perfil 2 para Guayabo u y Quebrada Hornillas.

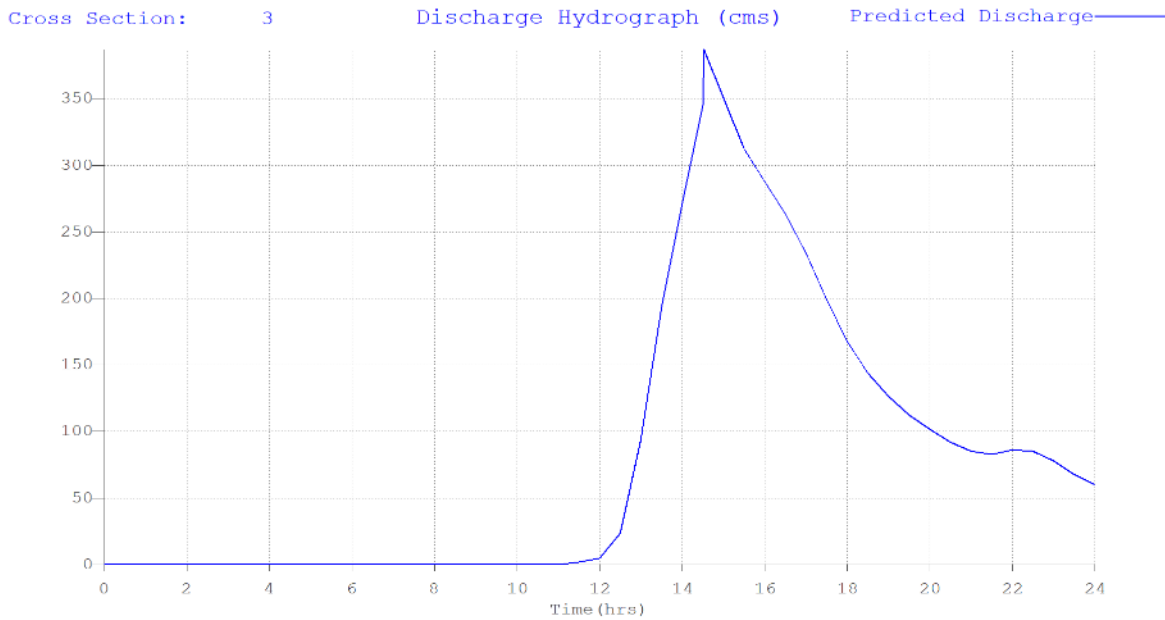


Figura 9-38 Continuidad evaluada en el perfil 3 para Guayabo u y Quebrada Hornillas.

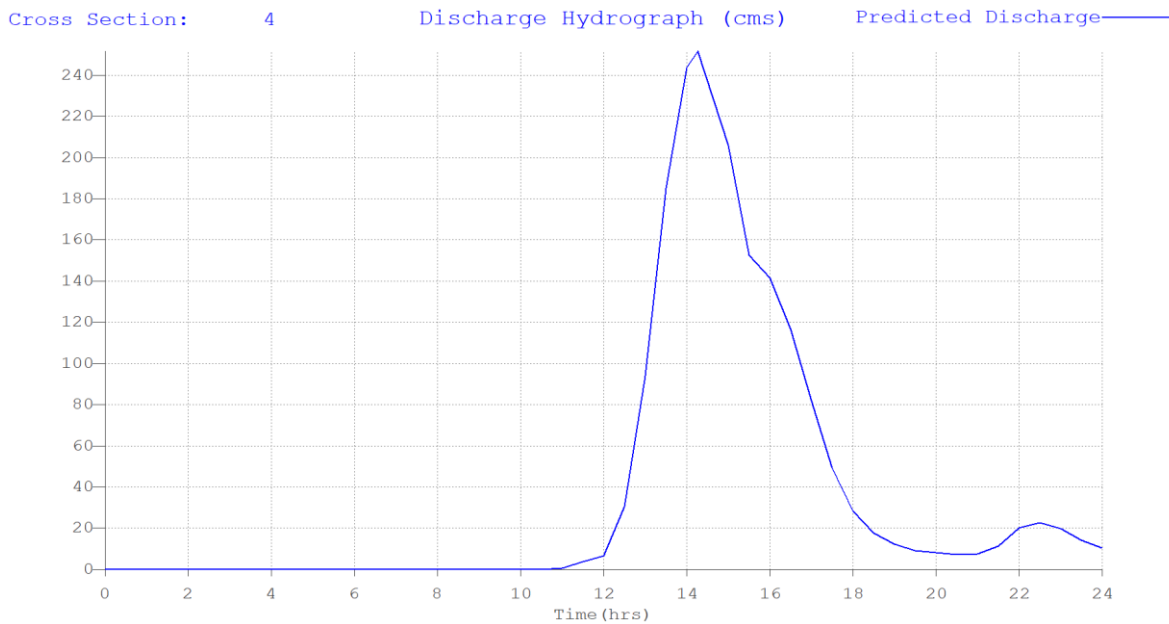


Figura 9-39 Continuidad evaluada en el perfil 4 para Guayabo u y Quebrada Hornillas.

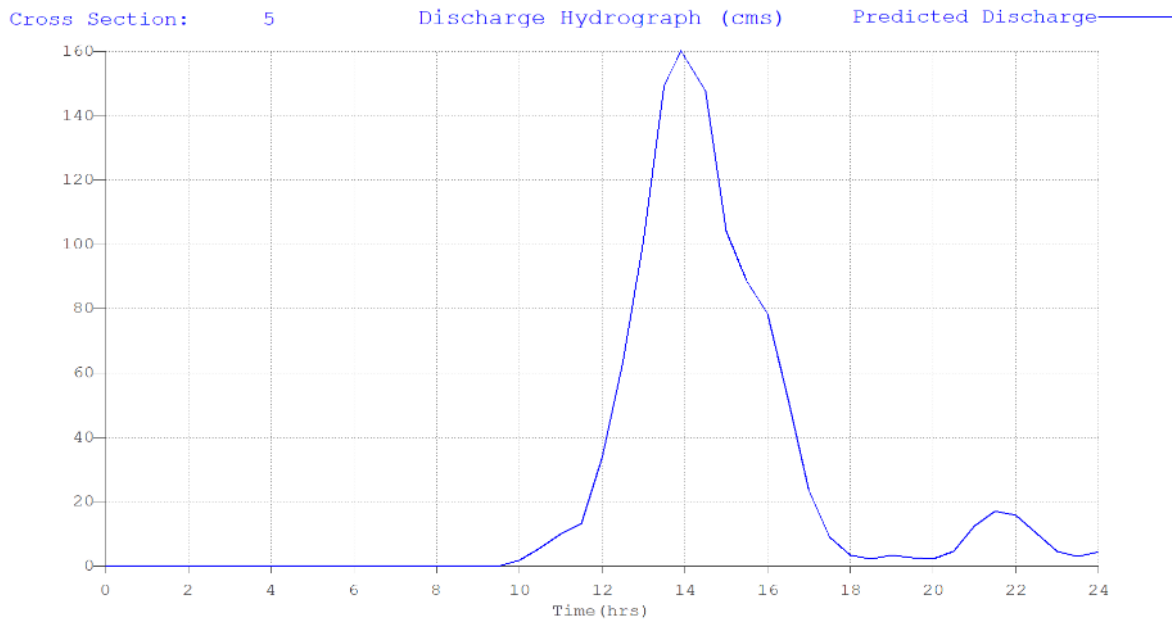


Figura 9-40 Continuidad evaluada en el perfil 5 para Guayabo u y Quebrada Hornillas.

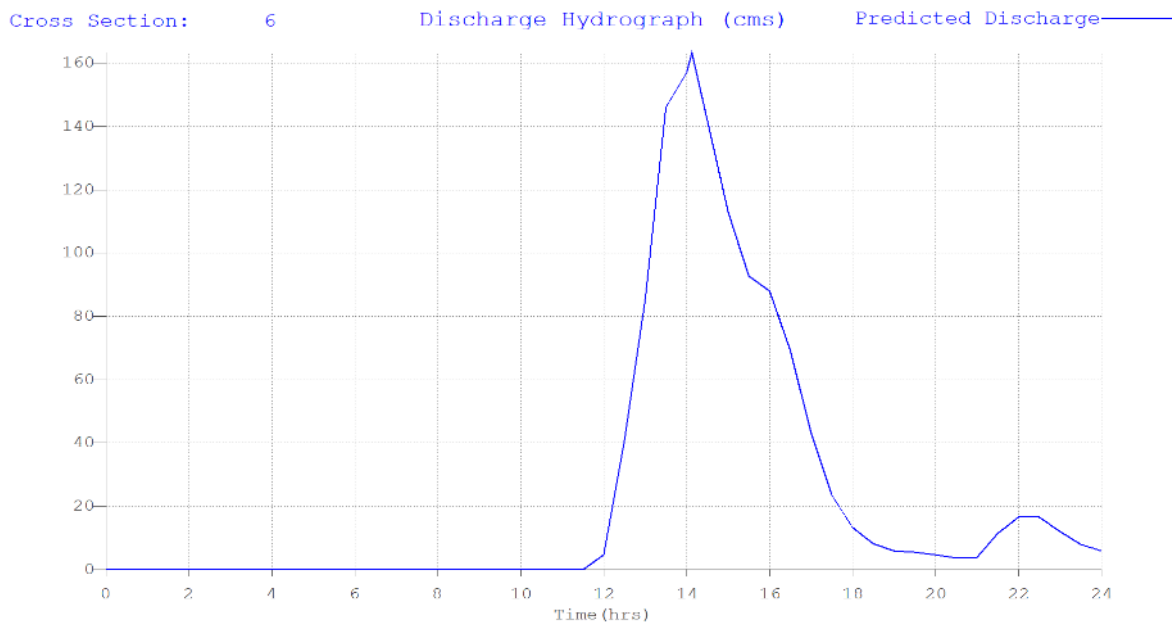


Figura 9-41 Continuidad evaluada en el perfil 6 para Guayabo u y Quebrada Hornillas.

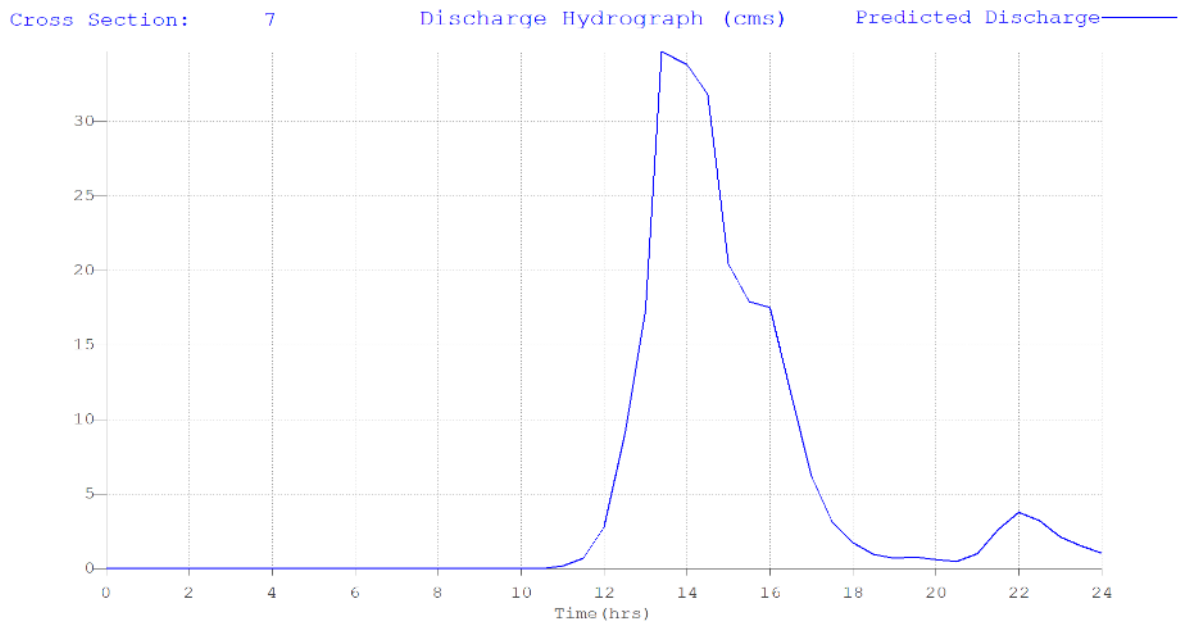


Figura 9-42 Continuidad evaluada en el perfil 7 para Guayabo u y Quebrada Hornillas.

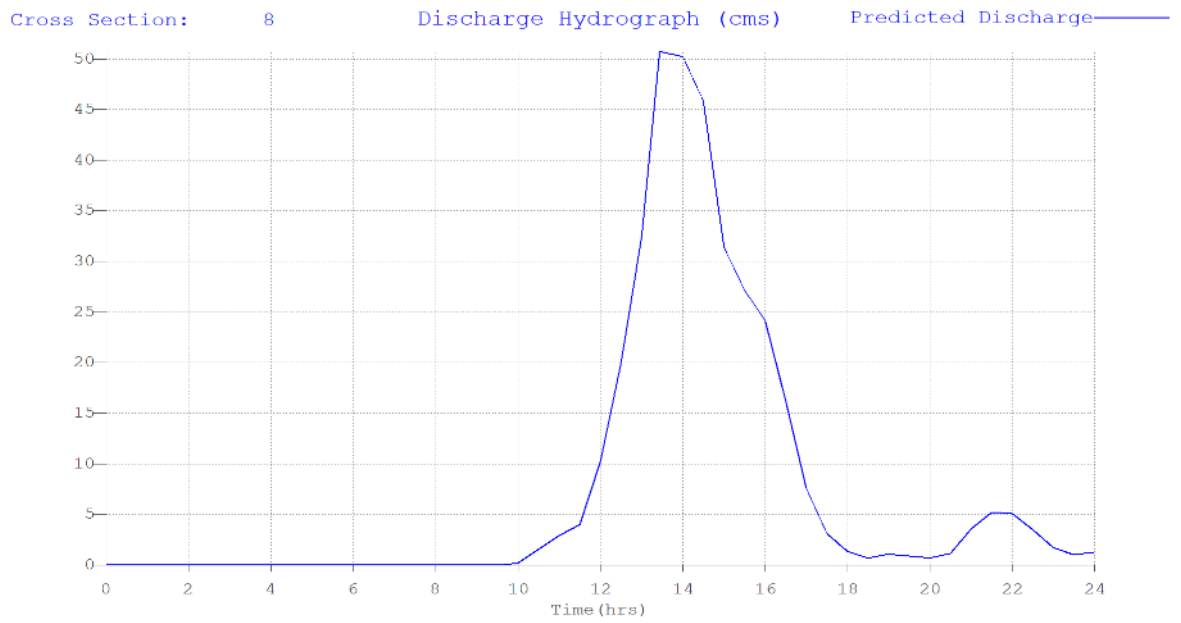


Figura 9-43 Continuidad evaluada en el perfil 8 para Guayabo u y Quebrada Hornillas.

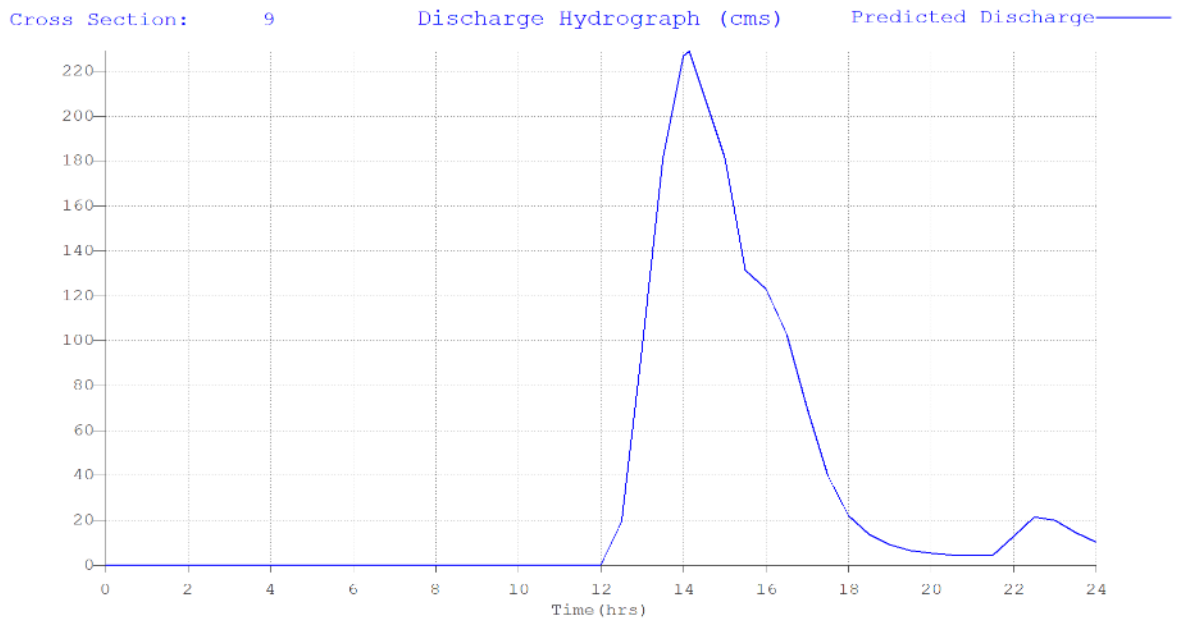
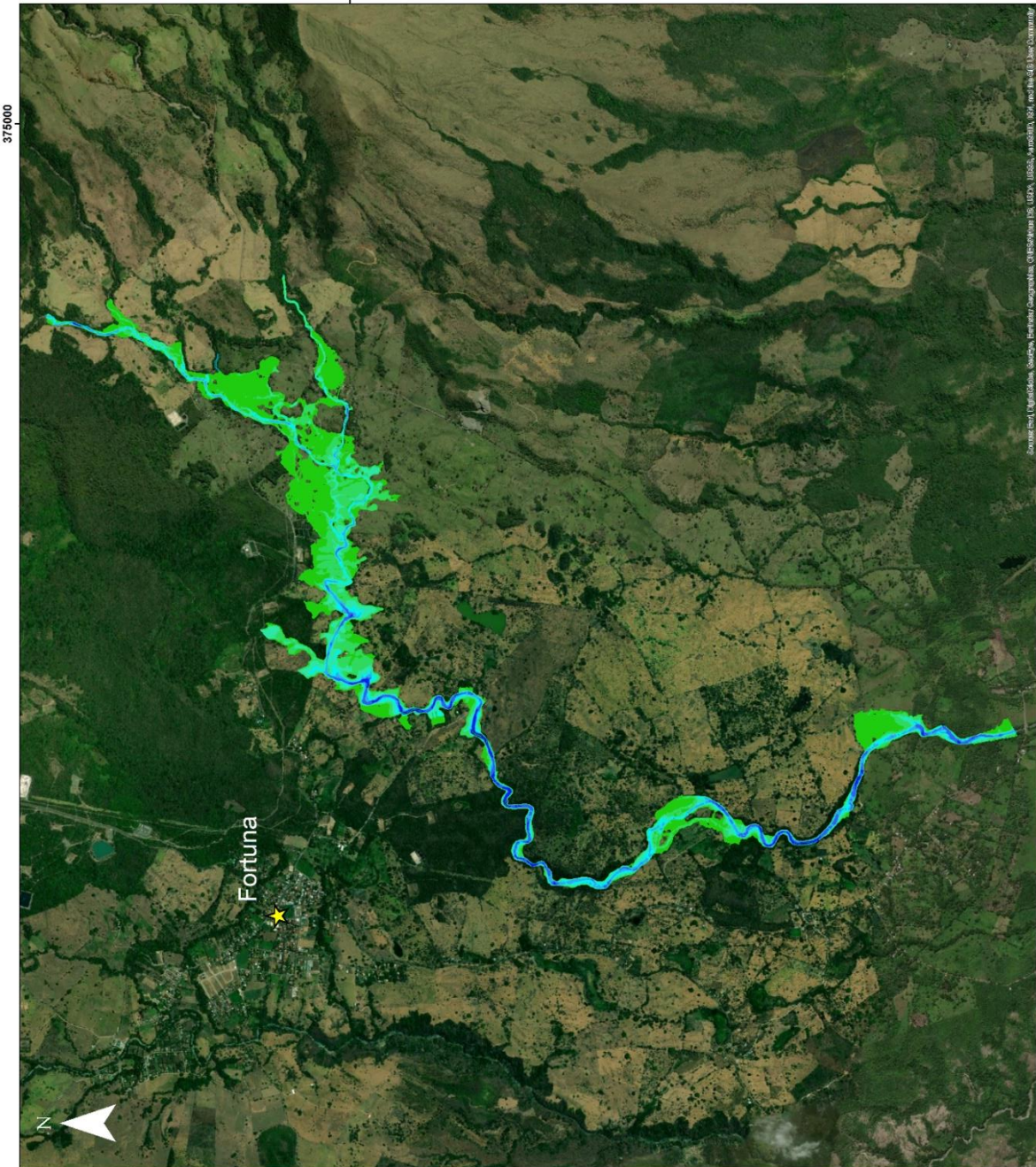
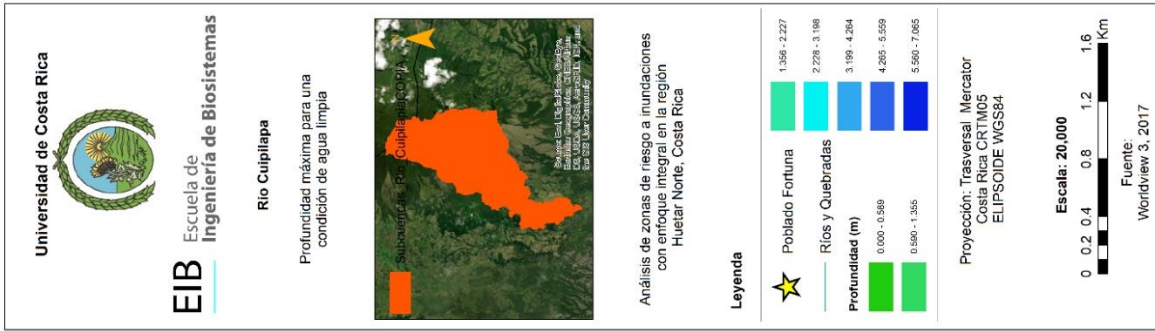



Figura 9-44 Continuidad evaluada en el perfil 9 para Guayabo u y Quebrada Hornillas.

Apéndice G. Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Cuipilapa
para distintos escenarios



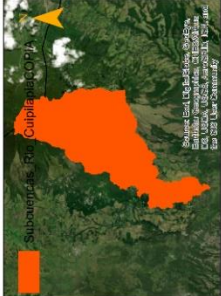


Universidad de Costa Rica

EIB Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Río Cuiplilapa

Índice de amenaza para una condición de agua limpia



Subcuenca: Río Cuiplilapa (CRA)

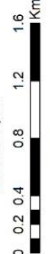
Analisis de zonas de riesgo a inundaciones con enfoque integral en la región Huelar Norte, Costa Rica

Legenda

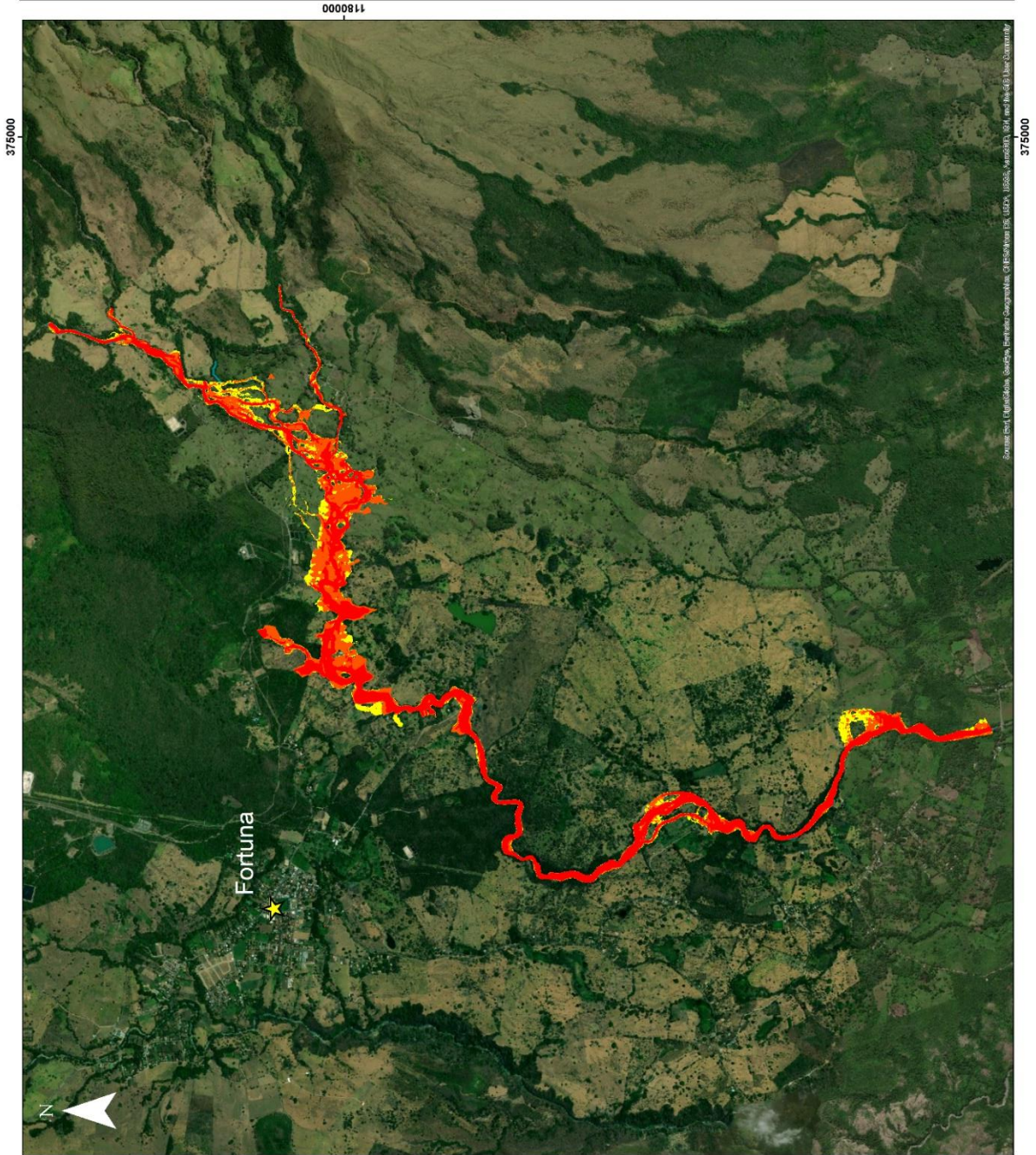
- Poblado Fortuna
- Ríos y Quebradas
- Índice de amenaza**
- 1
- 2
- 3

Proyección: Transversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84


Escala: 20,000



Fuente: Worldview 3, 2017



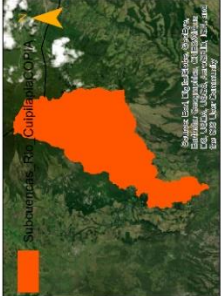
Universidad de Costa Rica



EIB Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Río Culpilapa



Velocidad máxima para una condición de agua limpia y un CN III



Subsección: Río Culpilapa (019A)

Problema: Análisis de zonas de riesgo a inundaciones con enfoque integral en la región Huelar Norte, Costa Rica


Leyenda

-  Poblado Fortuna
-  Ríos y Quebradas

Velocidad máxima (m/s)	
0.000 - 0.600	0.601 - 1.344
1.345 - 2.143	2.144 - 3.058
3.059 - 4.171	4.172 - 5.945
5.946 - 9.221	

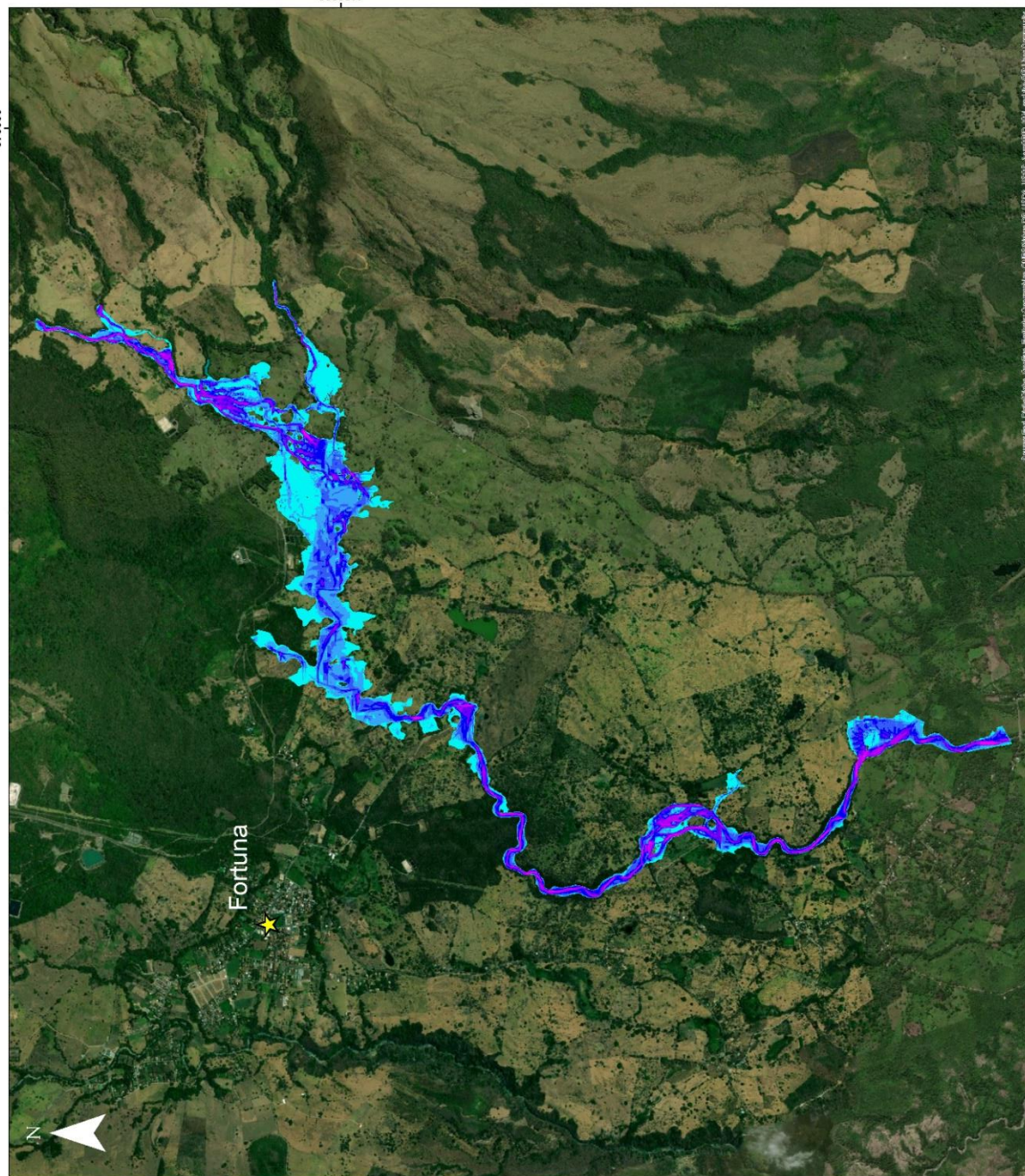
Proyección: Transversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84


Escala: 20,000




0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6 Km

Fuente:
Worldview 3, 2017





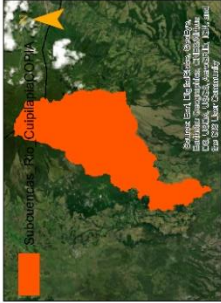
Universidad de Costa Rica



EIB Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Río Cuiplilapa

Índice de amenaza para una condición de agua limpia y un CN III



Subcuencias: Río Cuiplilapa (CN III)

Análisis de zonas de riesgo a inundaciones con enfoque integral en la región Huetar Norte, Costa Rica


Leyenda

- Poblado Fortuna
- Ríos y Quebradas

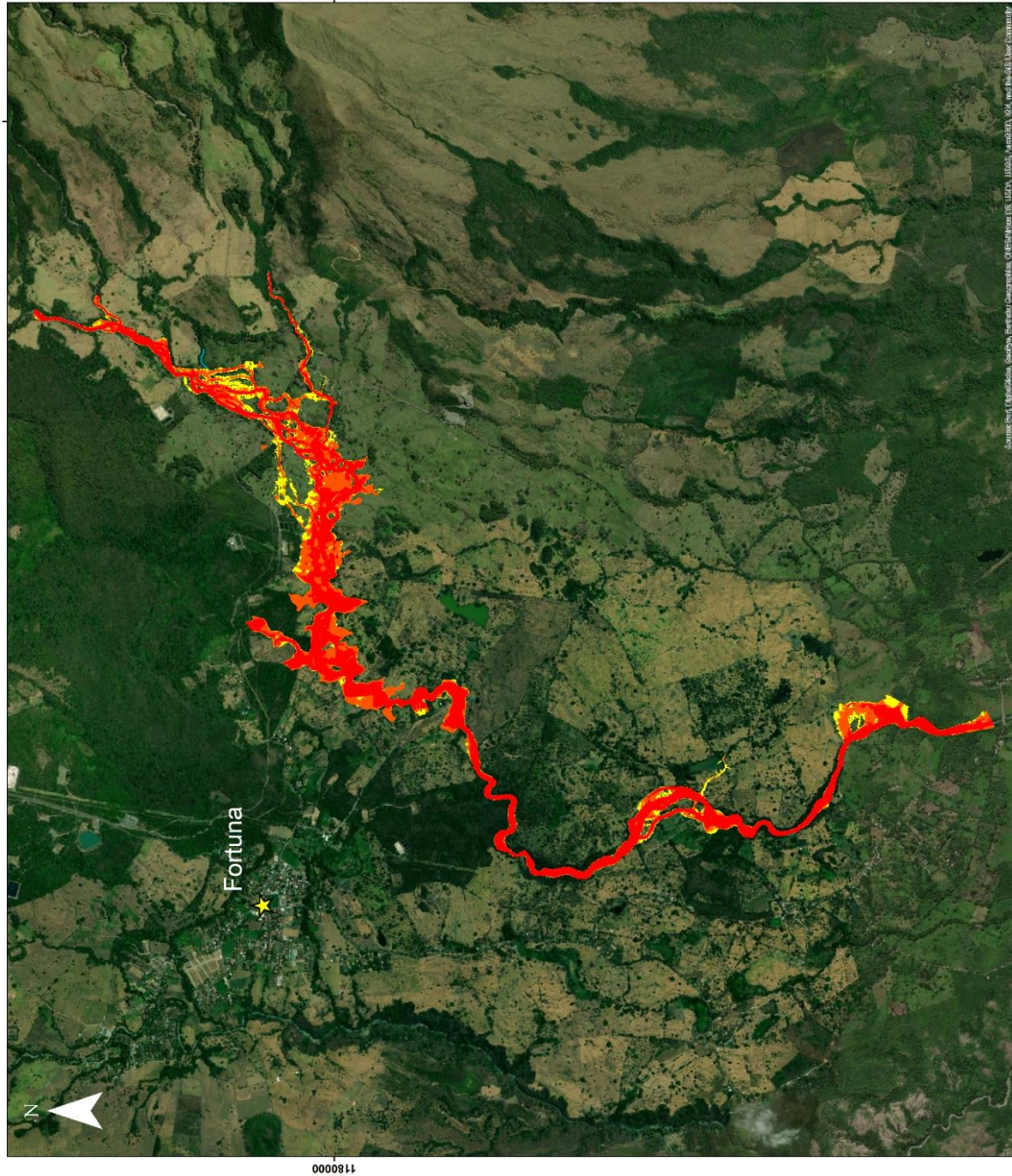
Índice de amenaza	
	1
	2
	3

Proyección: Tránsito Mercator
Costa Rica: CRTM05
ELIPSOIDE WGS84


Escala: 20,000



Fuente: Worldview 3, 2017



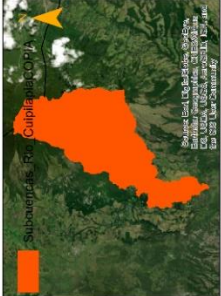
Universidad de Costa Rica



EIB Escuela de Ingeniería de Biosistemas










Río Cuiplilapa

Profundidad máxima para una condición de CN II y CV 0.5




Analisis de zonas de riesgo a inundaciones con enfoque integral en la región Huelar Norte, Costa Rica

Leyenda

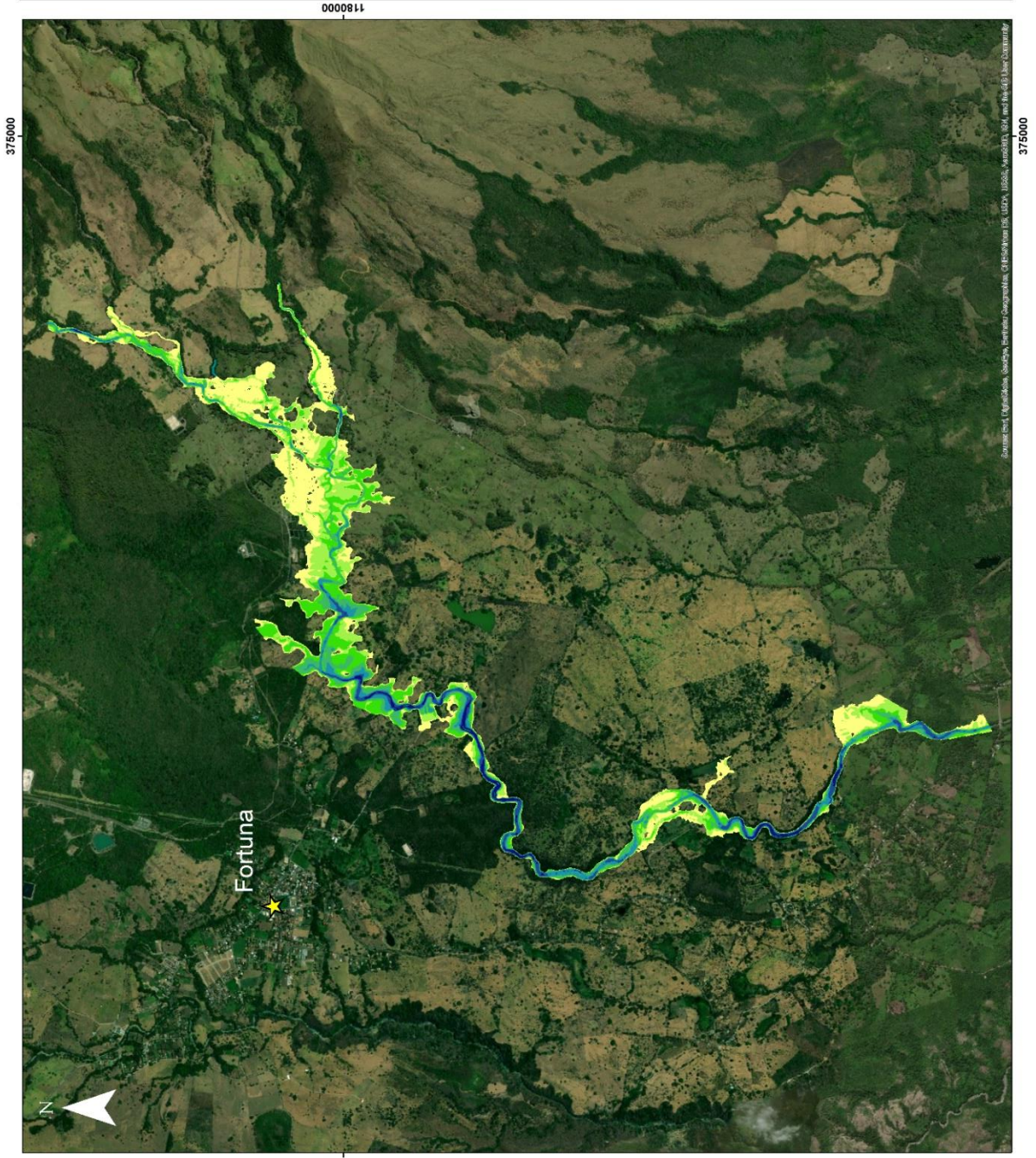
-  Poblado Fortuna
-  Ríos y Quebradas
- Profundidad (m)**
-  0.000 - 0.840
-  0.841 - 1.729
-  1.730 - 2.747
-  2.748 - 3.962
-  3.963 - 5.440
-  5.441 - 7.286
-  7.287 - 9.796

Proyección: Transversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84


Escala: 20,000



Fuente:
Worldview 3, 2017



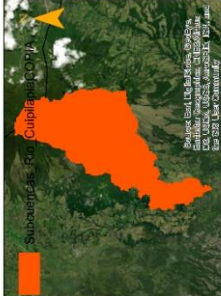
Universidad de Costa Rica



EIB Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Río Cuiplilapa


Índice de amenaza para una condición de CNII y CV 0.5




Subcuencas: Río Cuiplilapa-COPIA

Análisis de zonas de riesgo a inundaciones con enfoque integral en la región Huetar Norte, Costa Rica

Leyenda



Poblado Fortuna




Ríos y Quebradas

Índice de amenaza

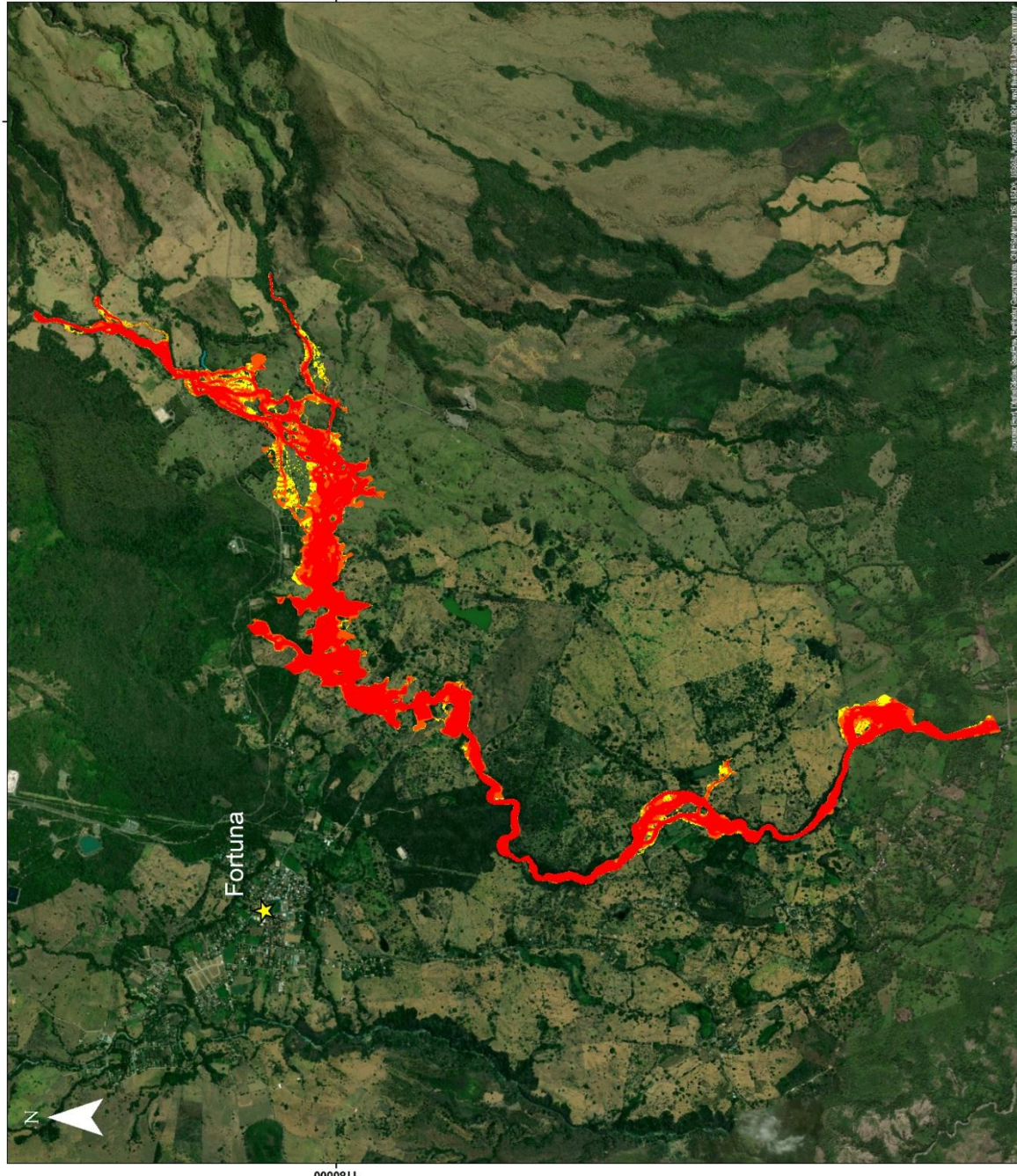
	1
	2
	3

Proyección: Transversal Mercator
 Zona: RICA CRTM05
 ELIPSOIDE WGS84


Escala: 20,000



Fuente: Worldview 3, 2017



Universidad de Costa Rica




UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

Cupilapa

Profundidad máxima para una
condición de agua limpia y un período de
retorno 10 años



Subcuencas: Rio Blanco-COPHA

Elaborado por: EIB de la Universidad de Costa Rica
Cupilapa, Costa Rica, 2017
© 2017 EIB de la Universidad de Costa Rica
All Rights Reserved


Análisis de zonas de riesgo a inundaciones
con enfoque integral en la región
Huetar Norte, Costa Rica

Profundidad (m)

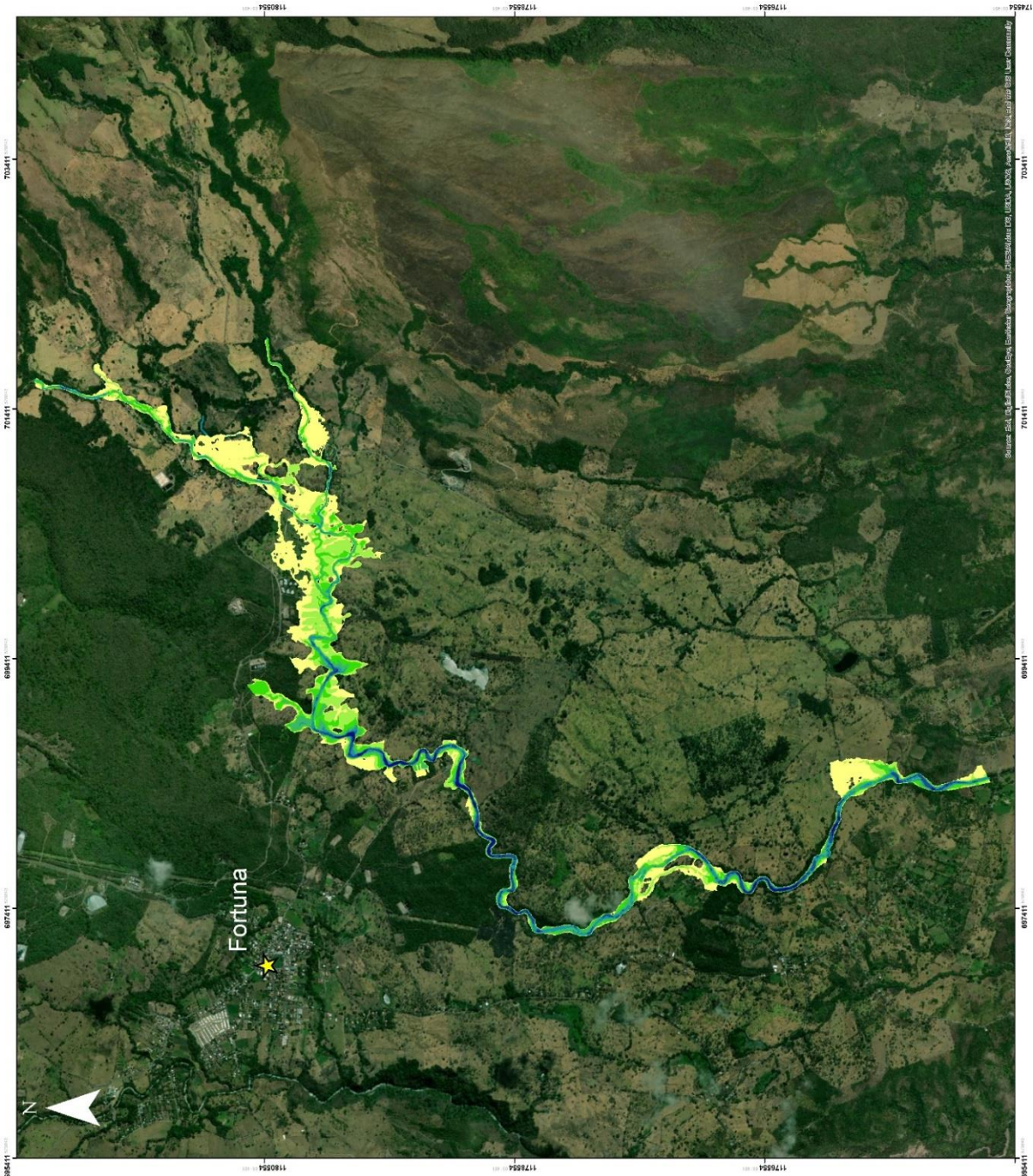
★ Poblado Fortuna	2.128 - 3.094
Rio: Guayabo	3.095 - 4.190
	4.191 - 5.502
	5.503 - 7.952
	1.288 - 2.127
	0.030 - 0.573
	0.574 - 1.287

Proyección: Tránsversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84


Escala: 20,000



Fuente:
Worldview 3, 2017



Universidad de Costa Rica




UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

Cupilapa

Profundidad máxima para una
condición de agua limpia y un período de
retorno 100 años



Subcuencas: Río BlancoCOPHA

Elaborado por: EIB de la Universidad de Costa Rica
COPHA, 2017. Fuente: SRTM30 PLUS
USGS, 2010. Cartografía
por EIB de la Universidad de Costa Rica

Análisis de zonas de riesgo a inundaciones
con enfoque integral en la región
Huetar Norte, Costa Rica

Profundidad (m)

- ★ Pueblo Fortuna
- Ríos: guayabo

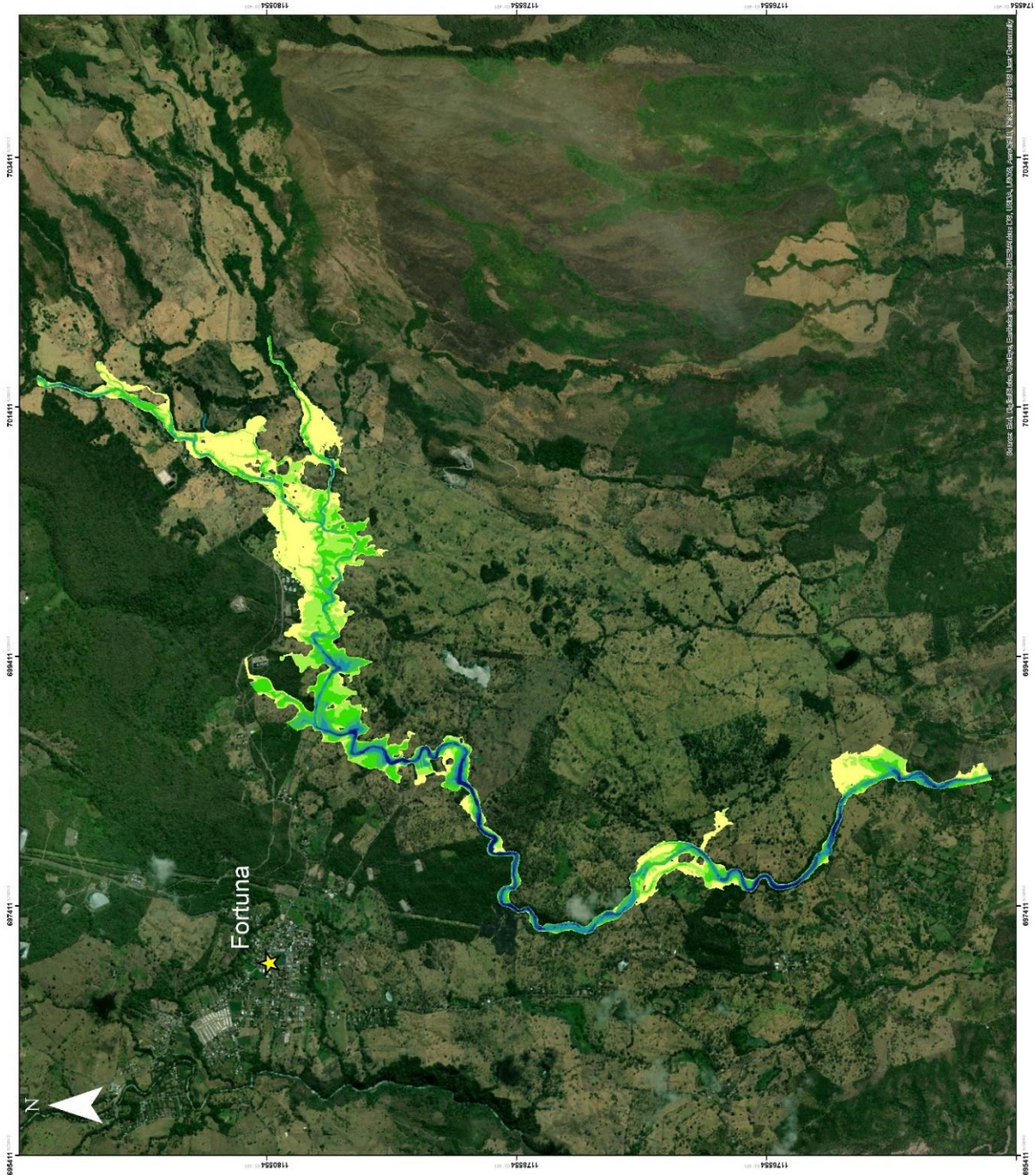
0.030 - 0.688	2.482 - 3.946
0.689 - 1.525	3.947 - 5.080
1.526 - 2.481	5.081 - 6.839
	6.840 - 10.077

Proyección: Transversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84


Escala: 20,000

0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6 Km

Fuente:
Worldview 3, 2017




Universidad de Costa Rica



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

Índice de amenaza para una
condición de agua limpia y un
período de retorno de 100 años








Subcuencas: Río BlancoCOPHA

Elaborado por: EIB de la Universidad de Costa Rica
COPHA, 2017. Fuente: COPHA, 2017. Fuente: COPHA, 2017.

Análisis de zonas de riesgo a inundaciones
con enfoque integral en la región
Huetar Norte, Costa Rica

Índice de amenaza

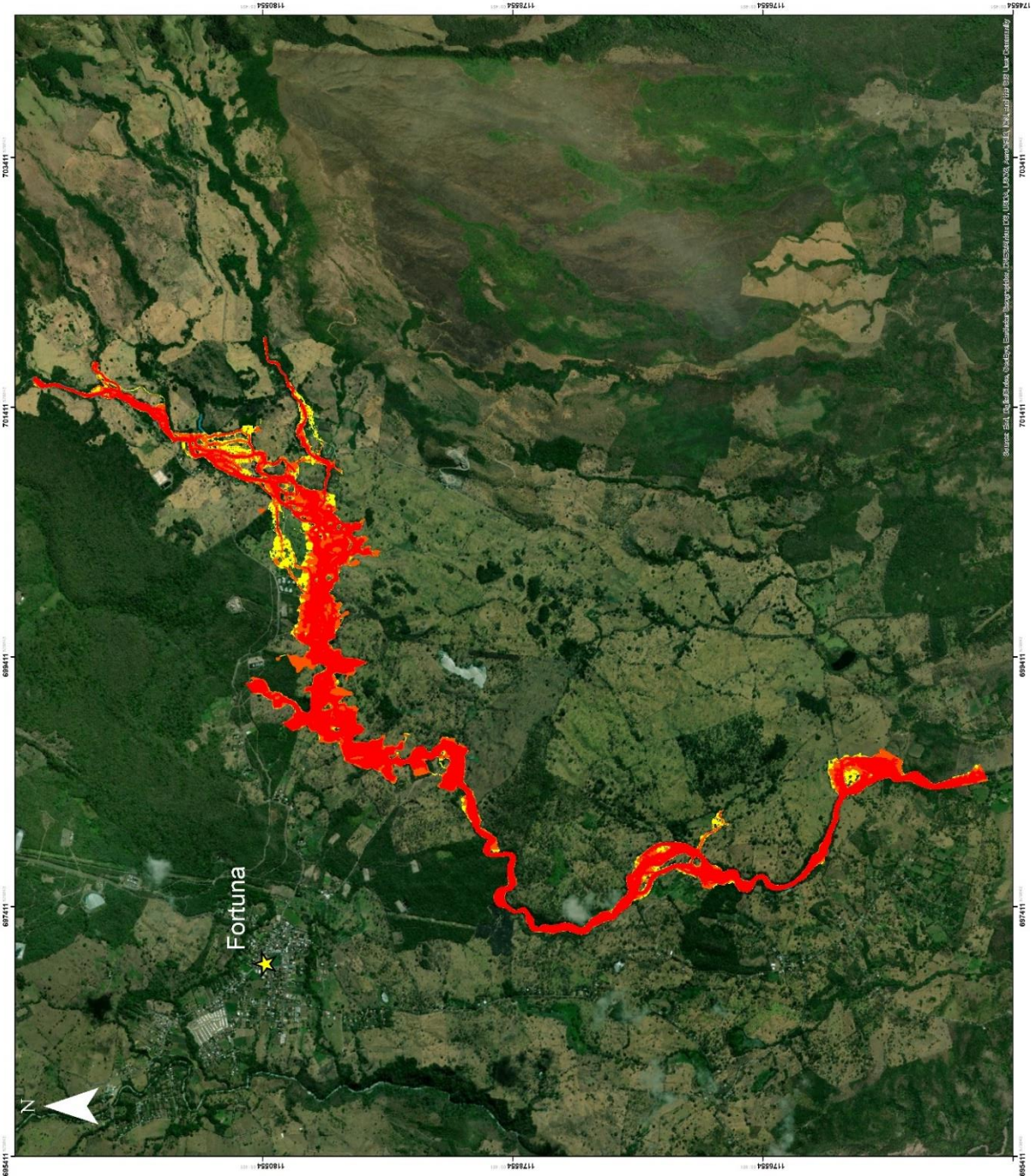
-  Poblado Fortuna
-  Ríos: guayabo
-  1
-  2
-  3

Proyección: Transversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84

Escala: 20,000


0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6 Km

Fuente:
Worldview 3, 2017



Apéndice H. Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Guayabo y Quebrada Hornillas para distintos escenarios.

Universidad de Costa Rica

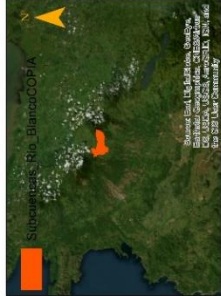


UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

Guayabo

Velocidad máxima para una
condición de agua limpia y un CN II



Subvención No. BlancoCOPJA

Soledad Estel, T. B. Barrios, S. Barrios,
Eduardo Cordero, J. C. Escobar,
C. Escobar, J. Escobar, R. Escobar,
E. Escobar, L. Escobar

Análisis de zonas de riesgo a inundaciones
con enfoque integral en la región
Huetar Norte, Costa Rica

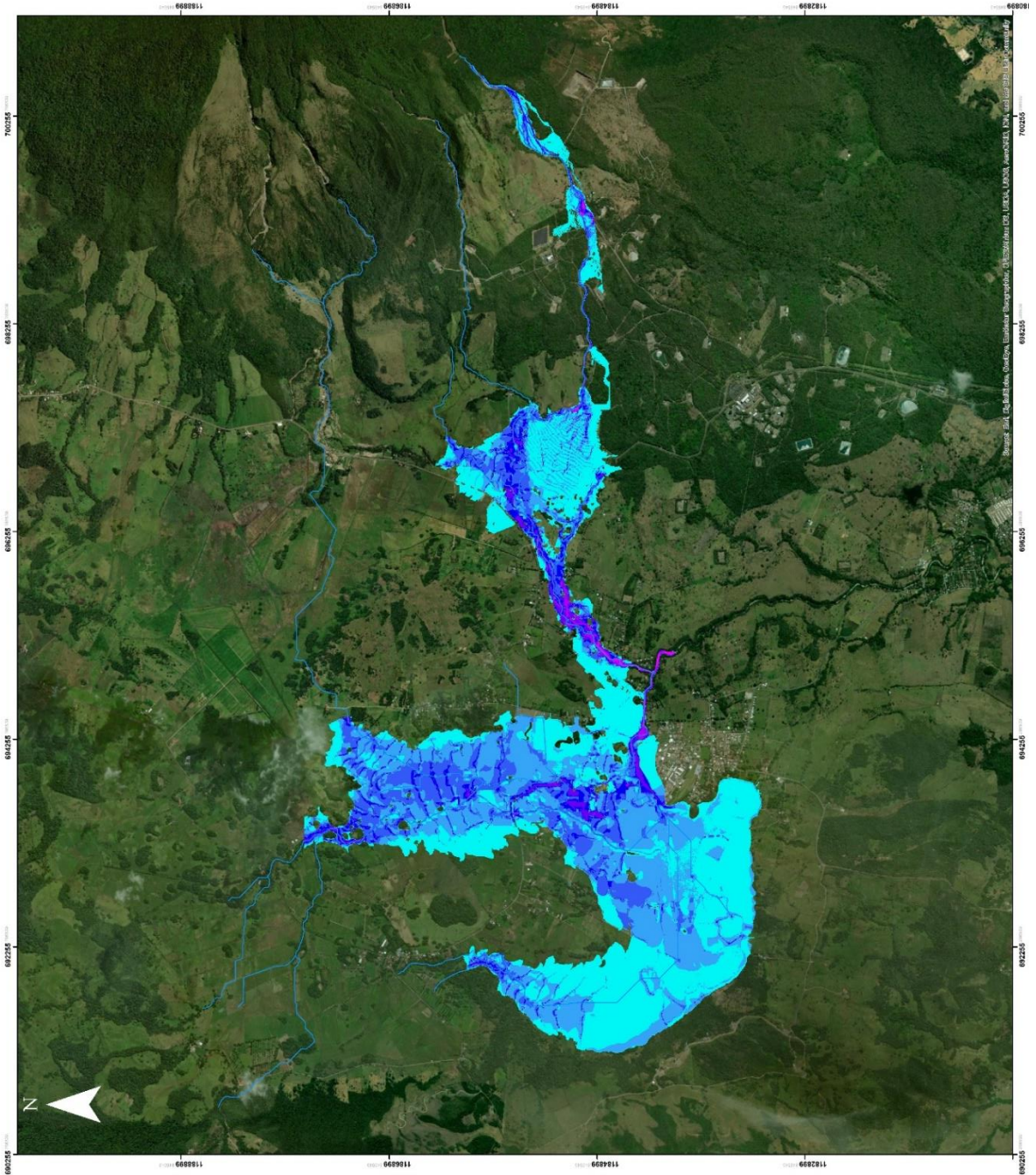
Velocidad (m/s)	
0.760 - 1.286	Ries. Guayabo
0.000 - 0.226	0.000 - 0.226
0.227 - 0.437	0.227 - 0.437
0.438 - 0.759	0.438 - 0.759
1.287 - 2.100	1.287 - 2.100
2.101 - 3.430	2.101 - 3.430
3.431 - 7.733	3.431 - 7.733

Proyección: Transversal Mercator
Costa Rica CRT11005
ELIPSOIDE WGS84


Escala: 24,000

0 0.22 0.45 0.9 1.35 1.8 Km

Fuente:
Worldview 3, 2017



Universidad de Costa Rica

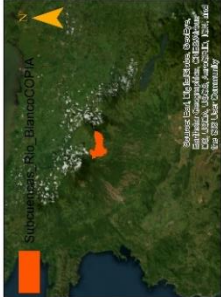


UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

Guayabo

Índice de amenaza para una
condición de agua limpia y un CNII



Velocidad (m/s)

Ríos_guayabo

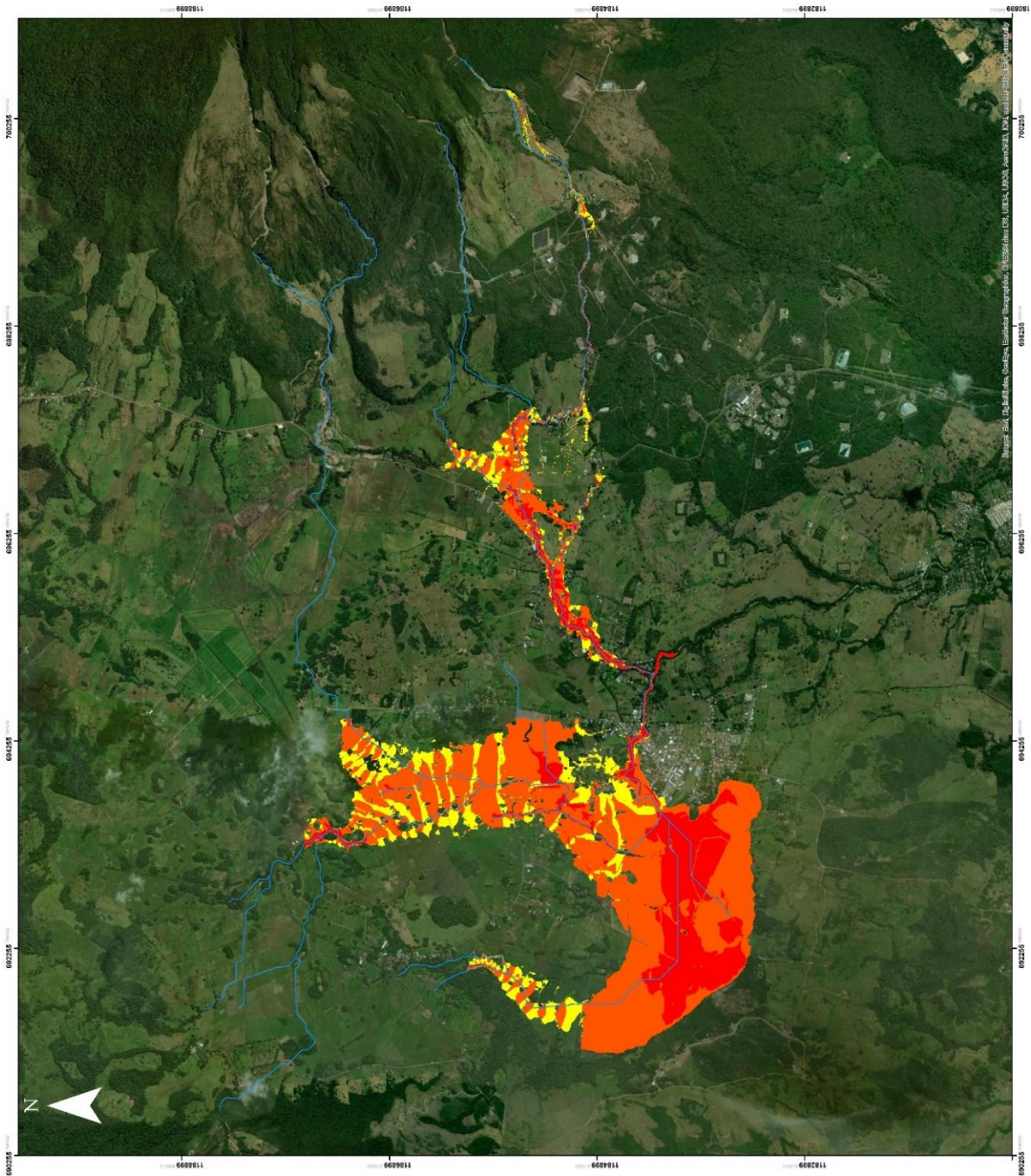
1
2
3

Proyección: Transversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84


Escala: 24,000
0 0.225 0.45 0.9 1.35 1.8
Km

Fuente:
Worldview 3, 2017

Análisis de zonas de riesgo a inundaciones
con enfoque integral en la región
Huelar Norte, Costa Rica



Universidad de Costa Rica

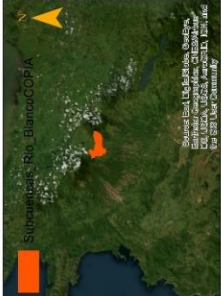


UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

Guayabo

Profundidad máxima para una
condición de agua limpia y un CN II CV04



Subcuencas: Río BlancoCOPIA

Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, IGN, GeoEye, CNES/Airbus, USDA, AeroGRID, IGN, Esri, DigitalGlobe, GeoEye, The Terra Image Company

Analisis de zonas de riesgo a inundaciones
con enfoque integral en la región
Huetar Norte, Costa Rica

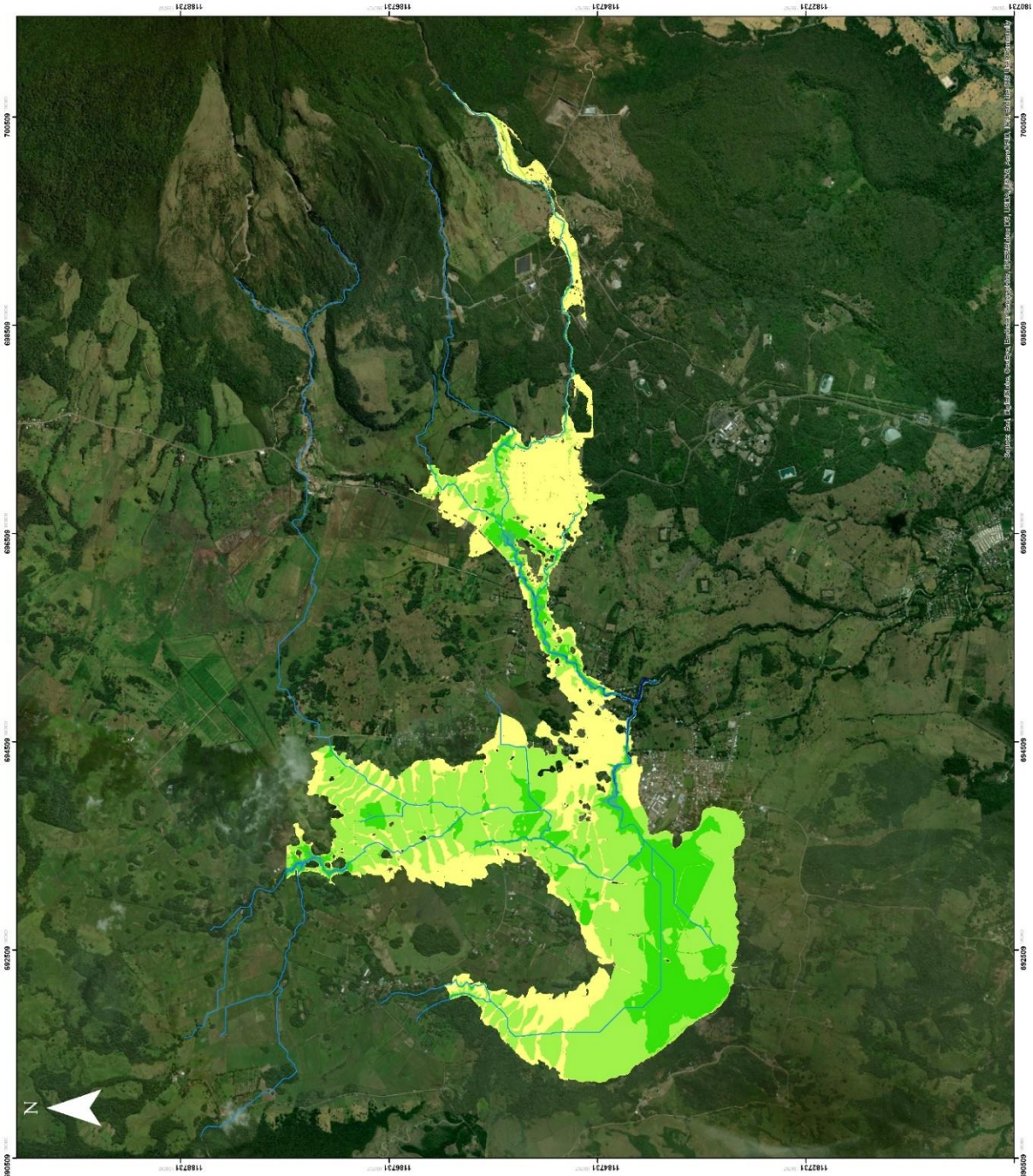
Profundidad (m)	
Río Guayabo	2.248 - 3.224
0.000 - 0.629	3.225 - 4.573
0.630 - 1.431	4.574 - 6.786
1.432 - 2.247	6.787 - 10.208

Proyección: Transversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84


Escala: 24.000

0 0.225 0.45 0.9 1.35 1.8 Km

Fuente:
Worldview 3, 2017



Universidad de Costa Rica




UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

Guayabo

Velocidad máxima para una
condición de agua limpia y un CN II y CV 04



Subcuencas: Río BlancoCOPIA

Escuela de Ingeniería de Biosistemas
C.R. 10000, Guayabo, San José, Costa Rica
Tel: +506 2252 4000
E-mail: eib@unccr.ac.cr

Proyección: Transversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84

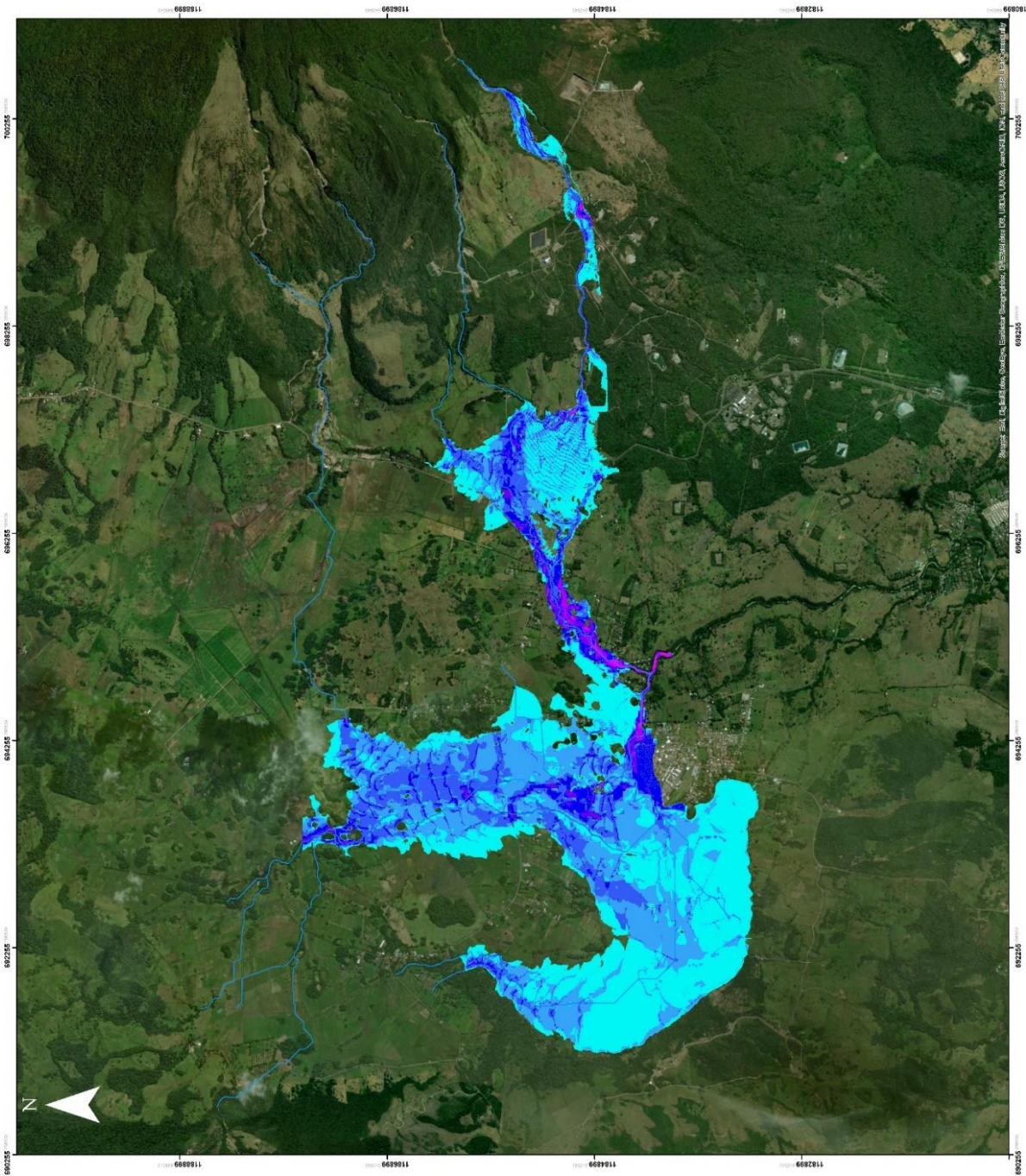
Escala: 24,000

0 0.225 0.45 0.9 1.35 1.8
Km


Fuente:
Worldview 3, 2017

Velocidad (m/s)

0.000 - 0.261	0.262 - 0.510	0.511 - 0.772	0.773 - 1.457
1.458 - 2.321	2.322 - 3.661	3.662 - 7.323	




Universidad de Costa Rica



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

Profundidad máxima para una
condición de agua limpia y un periodo de
retorno 5 años



Subcuencas: Río BlancoCOPIA

Elaborado por: L. Rodríguez, B. Rodríguez,
D. Utrilla, M. Soto, A. Sánchez, R. Barahona,
E. P. 2017. AAPP. Cartografía

Profundidad (m)

0.000 - 0.363	1.875 - 2.766
0.364 - 0.852	2.767 - 3.910
0.853 - 1.327	3.911 - 6.063
1.328 - 1.874	

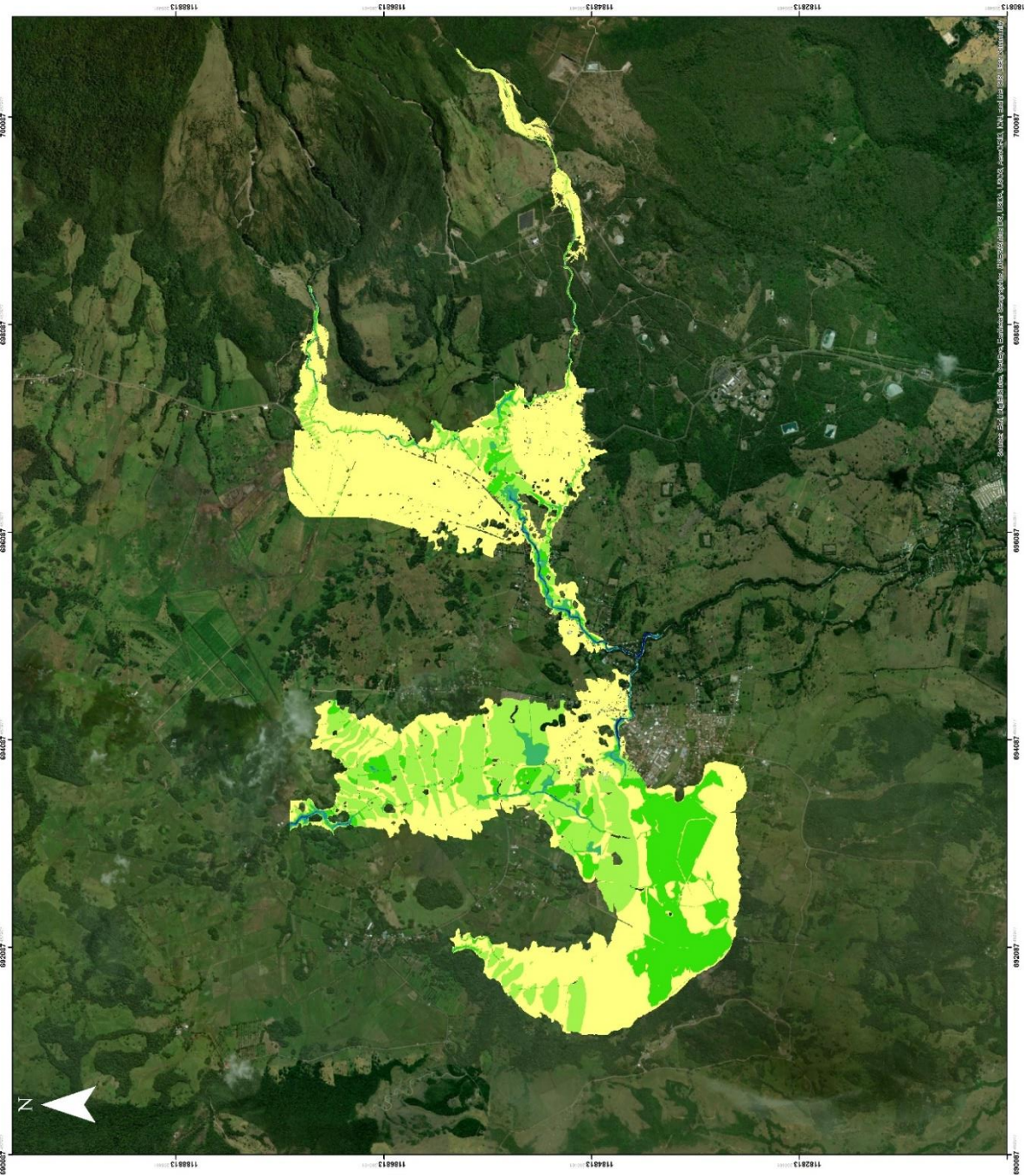
Proyección: Tránsversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84

Escala: 24,000


0 0.225 0.45 0.9 1.35 1.8 Km

Fuente:
Worldview 3, 2017

Análisis de zonas de riesgo a inundaciones
con enfoque integral en la región
Hueliar Norte, Costa Rica




Universidad de Costa Rica



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

Velocidad máxima para una
condición de agua limpia y un periodo
de retorno de 5 años



Subcuencas: Río BlancoCOPÍA

Escuela de Ingeniería de Biosistemas
EIB
CARRERA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS
CALLE 150, TORRE 100, SAN JOSÉ, COSTA RICA

Proyección: Tránsversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84

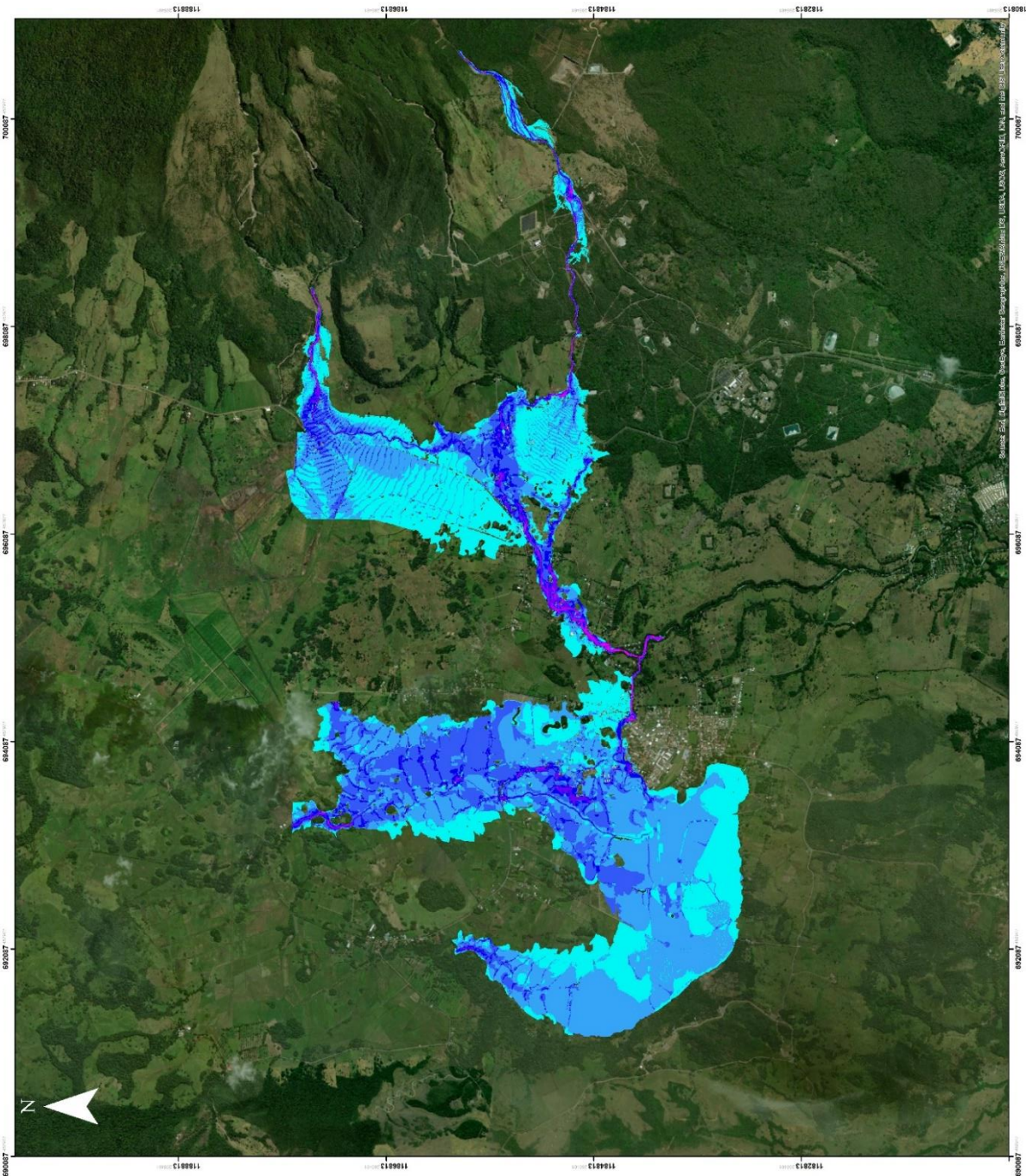
Escala: 24,000

0 0.225 0.45 0.9 1.35 1.8
Km


Fuente:
Worldview 3, 2017

Velocidad (m/s)

0.000 - 0.150	1.121 - 1.857
0.151 - 0.335	1.858 - 3.031
0.336 - 0.640	3.032 - 6.245
0.641 - 1.120	




Universidad de Costa Rica



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

Índice de amenaza para una
condición de agua limpia y un
período de retorno de 10 años



Subcuencas: Río BlancoCOPIA

Elaborado por: L. Delgado, G. Ballesteros,
D. C. López, M. López, A. Sánchez, J. Ruiz, etc.
E-MAIL: delgado@unccr.ac.cr

Análisis de zonas de riesgo a inundaciones
con enfoque integral en la región
Huetar Norte, Costa Rica

Índice de amenaza

	1
	2
	3

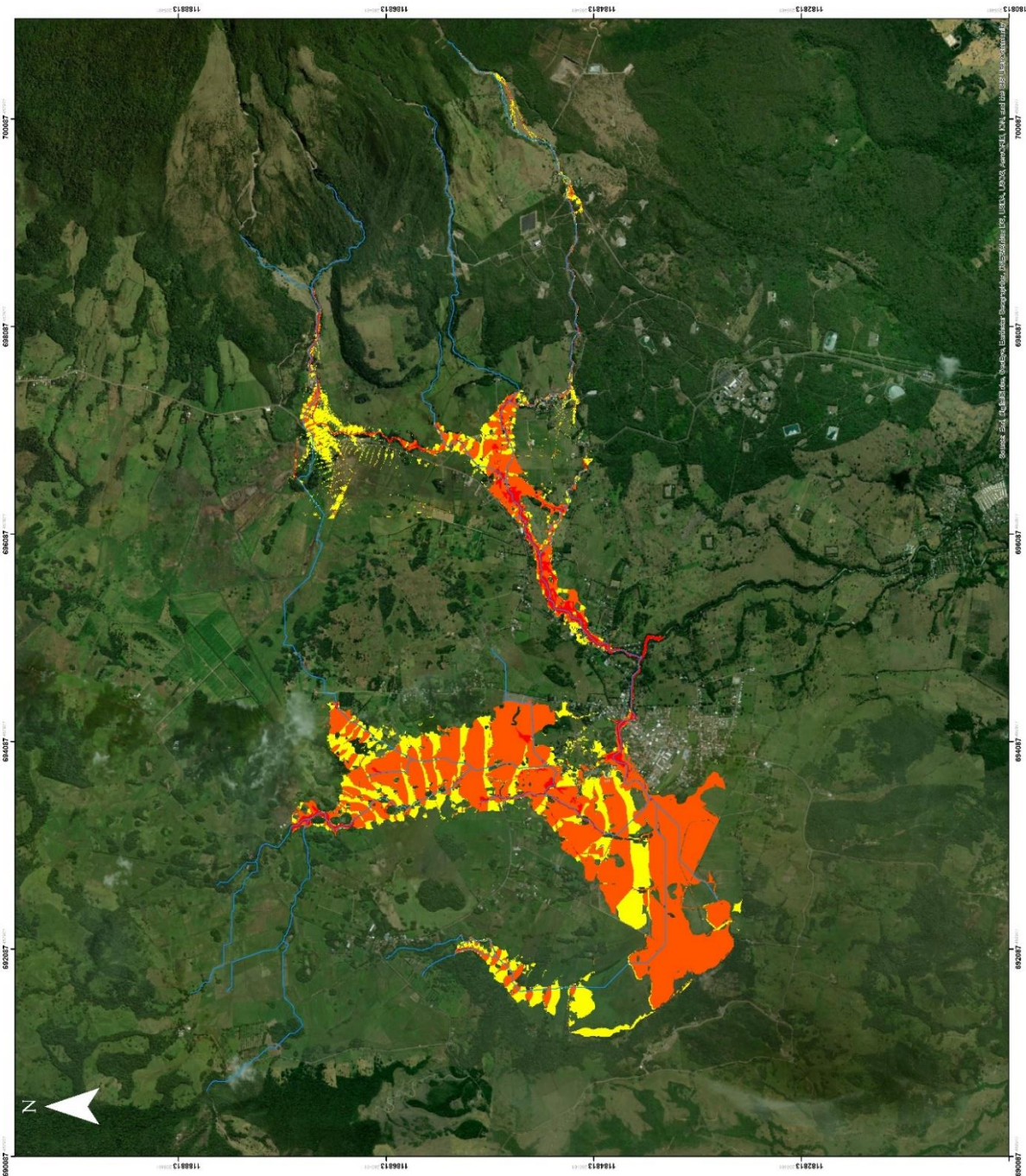
Ríos_guayabo

Proyección: Transversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84


Escala: 24,000

0 0.225 0.45 0.9 1.35 1.8 Km

Fuente:
Worldview 3, 2017




Universidad de Costa Rica



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

Velocidad máxima para una
condición de agua limpia y un periodo
de retorno de 25 años



Subirrepositorio Río Blanco-COPIA

Subirrepositorio Río Blanco-COPIA
El Estero de San Juan, San Juan, Costa Rica
Código Postal: 50101
Teléfono: +506 2222 4444

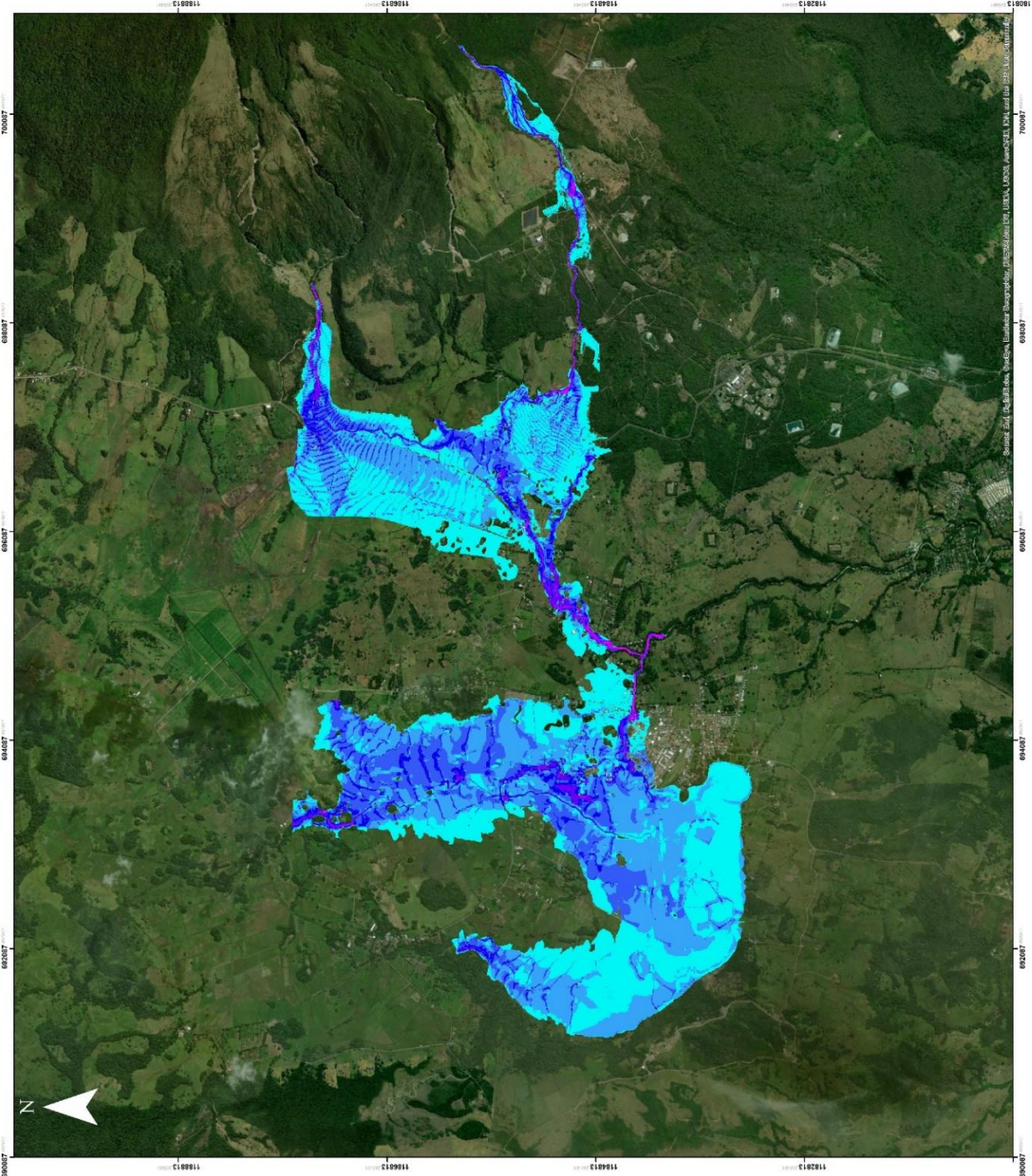
Análisis de zonas de riesgo a inundaciones
con enfoque integral en la región
Huetar Norte, Costa Rica

Velocidad (m/s)	
0.000 - 0.219	1.238 - 2.061
0.220 - 0.423	2.062 - 3.374
0.424 - 0.731	3.375 - 7.561
0.732 - 1.238	


Proyección: Transversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84

Escala: 24.000
0 0.225 0.45 0.9 1.35 1.8 Km

Fuente:
Worldview 3, 2017



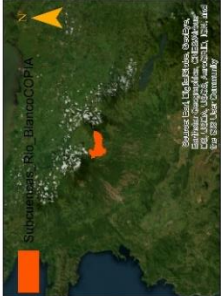
Universidad de Costa Rica



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

Índice de amenaza para una
condición de agua limpia y un
período de retorno de 25 años



Subcuenca: Río BlancoCOPIA

Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, IGN, AerGRID, USDA, AeroGRID, IGN, Esri, Air Photo, USDA, AeroGRID, IGN, Esri, Swire

Proyección: Transversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84

Escala: 24,000

0 0.225 0.45 0.9 1.35 1.8 Km

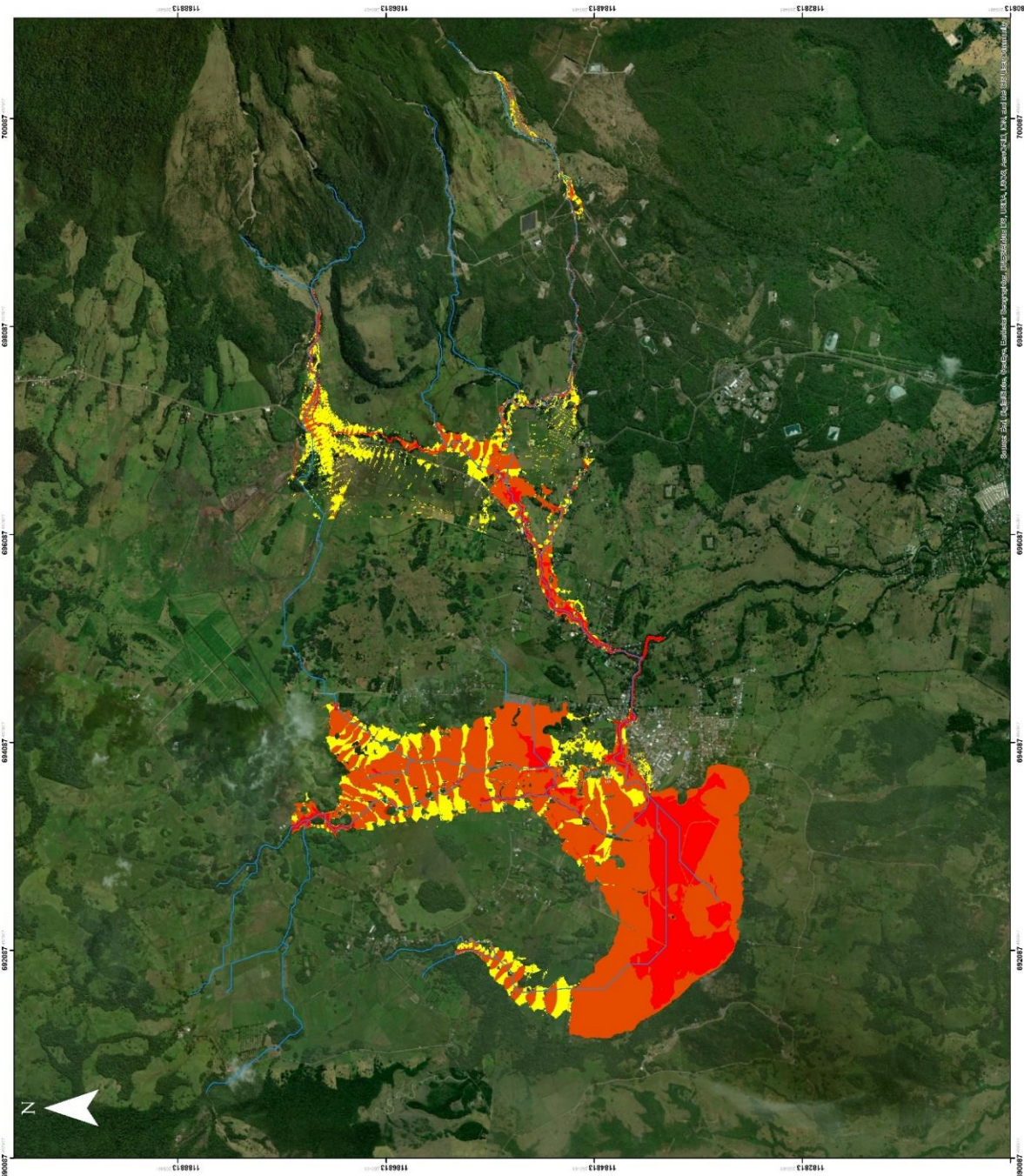
Fuente:
Worldview 3, 2017


Índice de amenaza

1
2
3


Ríos_guayabo

Análisis de zonas de riesgo a inundaciones
con enfoque integral en la región
Huetar Norte, Costa Rica



Universidad de Costa Rica

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
EIB Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Índice de amenaza para una condición de agua limpia y un periodo de retorno de 30 años



Subcuencas: Rio_BlancoCOPIA

Análisis de zonas de riesgo a inundaciones con enfoque integral en la región Huetar Norte, Costa Rica

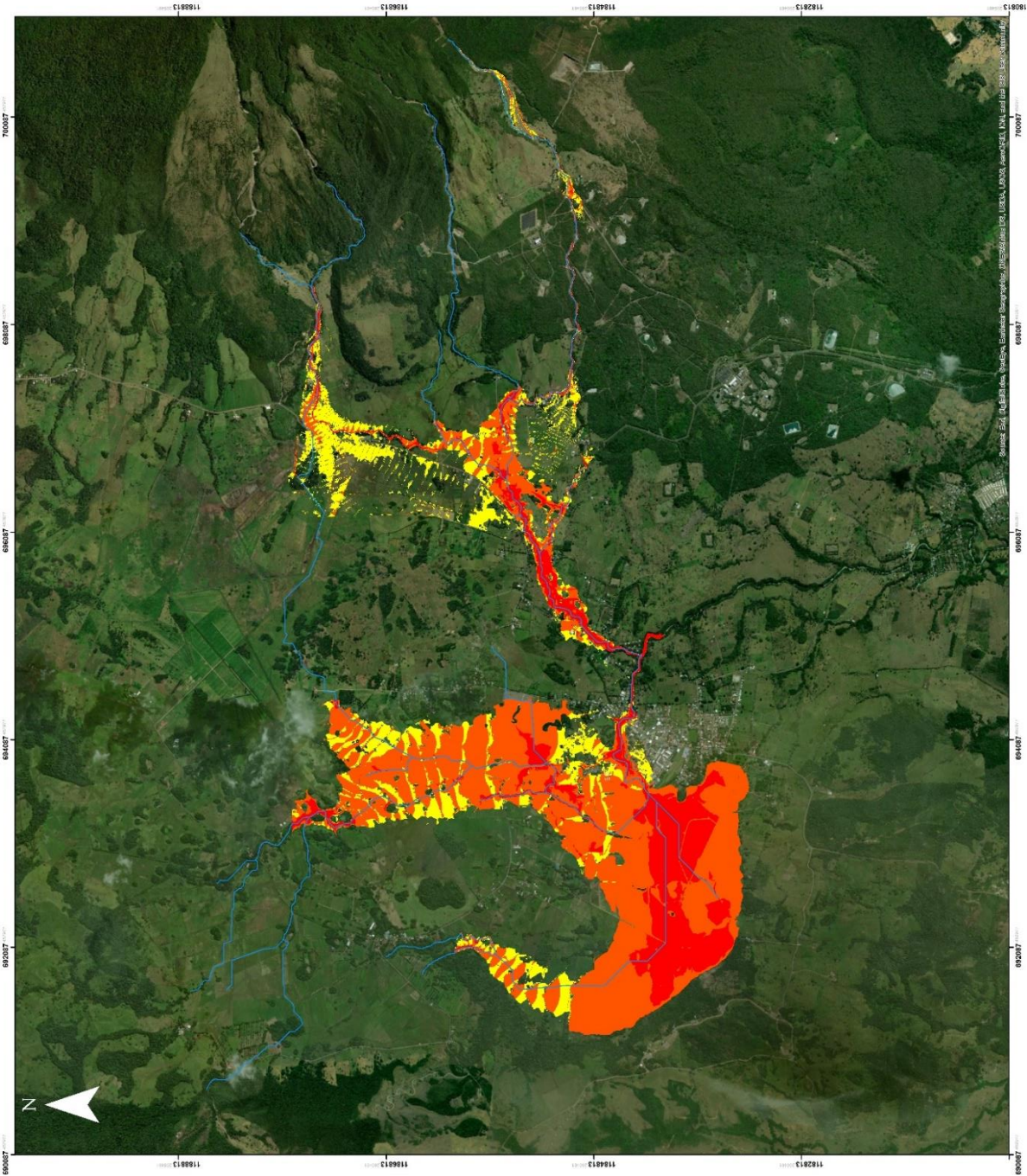
Índice de amenaza

	1
	2
	3


— Ríos_guayabo

Proyección: Transversal Mercator
 Costa Rica CRTM05
 ELIPSOIDE WGS84

Escala: 24,000
 0 0.22 0.45 0.9 1.35 1.8 Km
 Fuente: Worldview 3, 2017




Universidad de Costa Rica



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

Profundidad máxima para una
condición de agua limpia y un periodo de
retorno 100 años



Subcuencas: Río BlancoCOPIA

Elaborado por: L. Rodríguez, R. Ballester,
D. G. Ureña, M. G. Soto, A. Sánchez, R. Ríos, etc.
E-103 2017, Cartografía

Proyección: Tránsversal Mercator
Costa Rica CRTM05
ELIPSOIDE WGS84

Escala: 24,000

0 0.225 0.45 0.9 1.35 1.8
Km

Fuente:
Worldview 3, 2017

Profundidad (m)

0.000 - 0.546	2.946 - 4.185
0.549 - 1.311	4.186 - 6.328
1.312 - 2.080	6.329 - 9.625
2.081 - 2.947	

