

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DIRECCIÓN DE PROYECTOS

INFORME FINAL
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**Modelación Hidrodinámica y de Transporte de Sedimentos para
identificar las zonas de riesgo de inundación en la parte baja de la Cuenca
del Río Matina, Limón**

Entrega a: Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias

Período:

01 Enero 2017- 31 Diciembre 2018

Por:
Isabel Guzmán Arias
Fernando Watson Hernández
Karolina Villagra Mendoza

Diciembre, 2018

TABLA DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	3
	OBJETIVO GENERAL	4
	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
II.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Dinámica Fluvial	5
2.2	Estudio hidrológico	6
2.2.1	Fisiografía de la cuenca	7
2.2.2	Procesamiento y análisis de datos hidrológicos	7
2.3	Hidráulica de ríos	8
2.3.1	Modelación hidráulica	8
2.3.2	Estimación de parámetros en hidráulica fluvial	11
2.3.3	Plataformas de modelación	11
2.4	Inundaciones	13
2.5	Transporte de Sedimentos	16
2.4.1	Modelación de transporte de sedimentos	17
III.	METODOLOGÍA	18
3.1	Descripción del área de estudio	18
3.2	Estudio hidrológico de la cuenca	19
3.2.1	Análisis de caudales	19
3.3	Estudio hidráulico del río Matina	22
3.3.1	Geometría y mallado	22
3.3.2	Rugosidades	23
3.4	Transporte de sedimentos	23
3.4.1	Muestreo de sedimentos	23
3.4.2	Ubicación de los puntos de muestreo	24
3.4.3	Análisis de muestras de sedimentos	25
3.4.4	Modelación de transporte de sedimentos	26
IV.	RESULTADOS	28
4.1	Análisis de Caudales	28
4.2	Manchas de Inundación	32
4.2.1	Periodo de retorno 5 años	32
4.2.2	Periodo de retorno 10 años	35

4.2.3	Periodo de retorno 25 años.....	36
4.2.4	Periodo de retorno 50 años.....	38
4.2.5	Periodo de retorno 75 años.....	40
4.2.6	Periodo de retorno 100 años.....	42
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	45
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

I. INTRODUCCIÓN

Los efectos del cambio climático a nivel global, han variado en los últimos años debido a un aumento acelerado en la ocurrencia de desastres naturales alrededor del mundo y Costa Rica no es la excepción (Jiménez, 2011). Específicamente, la ubicación geográfica del país hace que la vertiente Atlántica tenga influencia de los eventos climáticos con registro de altas precipitaciones. Por esta razón, se suscitan continuamente eventos que dejan consecuencias perjudiciales para la zona Atlántica, además, la ausencia de estudios y diseños adecuados de las estructuras de protección y control y la falta de mantenimiento de infraestructura conocida, han provocado grandes afectaciones en las planicies de inundación de las cuencas pertenecientes a la vertiente Atlántica (Inder, 2016). Una de las cuencas más grandes es la del Río Chirripó, con una extensa red hídrica que se origina en la parte alta de la Cordillera de Talamanca y atraviesa una serie de comunidades en la parte baja de la subcuenca, como Matina y Estrada. La subcuenca del río Matina se considera un punto de alta vulnerabilidad del cantón de Matina ante las amenazas hidrometeorológicas, sin embargo, las condiciones naturales no son las únicas causantes de las inundaciones, el factor antropológico, también. Según la Comisión Nacional de Emergencias (2014), el desarrollo urbano en forma desordenada y con mínima planificación, y al margen de las leyes de desarrollo urbano y forestal, y los desechos sólidos depositados en los cauces ha reducido la capacidad de la sección hidráulica, lo que provoca el desbordamiento de ríos. En el periodo comprendido entre 1970-2004 se registraron al menos 88 localidades inundadas y 46 eventos climáticos que causaron inundaciones. El 63% de las inundaciones ocurrieron en los meses de noviembre, diciembre y enero; época en la que los suelos se encuentran saturados haciendo que el efecto de la escorrentía se vea aumentado por la disminución de la capacidad del suelo de la cuenca para infiltrar la lluvia o de la cobertura vegetal para interceptarla (Fallas, y Valverde, 2007). Por esta razón, desde la carretera sobre la ruta 32 hasta la desembocadura del río Matina se puede observar la presencia de diques como medida de protección ante avenidas máximas. Sin embargo, no existe un análisis integral que contemple la simulación numérica de posibles escenarios, del efecto que los diques tienen en la dinámica del flujo del río, ni su función como medida de protección. Los problemas se han ido agravando en los últimos años, por un aumento en la frecuencia y magnitud de los desbordamientos, que cambian la dinámica de erosión y sedimentación, provocando la inestabilidad de los cauces.

Además, los escenarios de cambio climático, evidencian una alteración en el régimen de las lluvias, lo cual, aunado al cambio en el uso del suelo, varían la realidad mostrada en los mapas de inundación actualmente disponibles, lo que imposibilita tomar acciones apropiadas en el tema de ordenamiento territorial. Las investigaciones que se hagan en el tema son de interés para instituciones del estado involucradas con la atención de inundaciones y construcción de obras, como, por ejemplo: Dirección de Agua del Minae, Comisión Nacional de Emergencia, Corporación Bananera Nacional y Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Por tal motivo se vuelve imperativo entender la dinámica actual del río Matina con el fin de generar una herramienta confiable de prevención y diseño, capaz de contribuir en la toma de decisiones para la prevención de desastres y diseño de obras de protección y de infraestructura (diques, puentes, protección de márgenes, etc). Este proyecto pretende evaluar la hidrodinámica y transporte de sedimentos en el tramo del río Matina por medio de modelos matemáticos en dos dimensiones. Se pretende identificar condiciones críticas de flujo y sedimentos, y simular posibles situaciones ante escenarios basados en ocurrencia de eventos extremos; útiles para una adecuada gestión de la cuenca, beneficiando a los productores (principalmente bananeros) y centros de población de la zona, así como los ecosistemas relacionados. De acuerdo a los modelos generados, se pretende crear mapas de inundación para diferentes periodos de retorno, los cuales servirán a instituciones en la toma oportuna de decisiones para la protección tanto civil como económica.

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar las condiciones de flujo y de capacidad de transporte de sedimentos para identificar zonas vulnerables a inundaciones en la planicie de inundación del río Matina.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la hidrología de la cuenca.
- Modelar la hidrodinámica de la parte baja del río Matina.
- Modelar el transporte de sedimentos de la parte baja del río Matina.
- Identificar zonas vulnerables a inundaciones.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dinámica Fluvial

El manejo de inundaciones se considera un proceso complejo donde interactúan aspectos hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos, ambientales, económicos y sociales. Utiliza, además, un sistema para la toma de decisiones basado, principalmente, en herramientas de modelado debido a la complejidad que envuelve el estudio de la dinámica fluvial. Se manejan modelos de acceso remoto, para sistemas de información geográfica, para simulaciones (hidrológicas, hidráulicas, meteorológicas, etc), para el análisis de riesgo y de políticas, entre otros (Ahmad y Simonovic, 2006). Estos modelos son utilizados como herramientas para el planeamiento y diseño de infraestructuras, así como para realizar pronósticos con el objetivo de implementar medidas de mitigación ante el impacto de eventos meteorológicos extremos.

Los datos hidrológicos en especial los hidrométricos son la base de los escenarios que se utilizarán en los modelos hidráulicos. Por lo general los cálculos hidrológicos parten de modelos matemáticos que transforman precipitación en caudal o escorrentía, sin embargo, cuando se logra contar con información de caudales medidos u observados, también se pueden aplicar modelos probabilísticos para determinar el comportamiento de esos caudales en el tiempo. Para entender la dinámica y comportamiento del cauce en diferentes condiciones se utilizan técnicas de modelado con el fin de predecir situaciones de flujo y contribuir a la toma de decisiones para el manejo de la cuenca. En la hidrodinámica del flujo existen modelos que pueden ser uni (1D) o bidimensionales (2D). Los modelos 1D calculan de una manera simplificada el nivel del agua en un canal abierto. Condensan una situación de flujo complicada (la cual es tridimensional) en un simple problema unidimensional, donde se asume que la sección transversal y la velocidad del fluido a una determinada profundidad son constantes (DAAD, 2006). Al ser unidimensional los parámetros son promediados a lo largo de la profundidad y sección transversal por lo que los resultados que se obtienen son valores promedios. Las ecuaciones que describen el movimiento en una dimensión del fluido son por lo general, la conservación de la masa y la energía, y la segunda Ley de Newton

(movimiento) (Jovanovic et al., 2006). Proporcionan una idea generalizada, en el corto y mediano plazo, de la situación del río ante una descarga, lo cual sirve, por ejemplo, para establecer zonas de inundación. Modelos en 2D describen el movimiento espacial del flujo (espacio) junto con los patrones de movimiento (tiempo). Asume una distribución logarítmica de la velocidad y permite procesos o interacciones complejas en los cauces. Esto permite realizar simulaciones más exhaustivas acerca del impacto de estructuras para determinar el riesgo de inundación en áreas cercanas a los ríos (DAAD, 2006). Las ecuaciones que resuelven problemas en dos dimensiones son por lo general: 1) ecuaciones de Navier-Stokes (Crossley, 1999 y NOAA, 2013), derivadas de la segunda ley de Newton (movimiento) donde la aceleración depende de la fuerza ejercida y proporcional a su masa (NOAA 2013), y 2) las ecuaciones de “aguas poco profundas” (Shallow water equations) conocidas también como ecuaciones de Saint Venant (Castro, et al., 2008 y Crossley, 1999) las cuales corresponden a una simplificación de las de Navier-Stokes.

Costa Rica presenta la particularidad de ubicarse en la franja más angosta de Centroamérica por lo que se ve afectada periódicamente por las condiciones climáticas reguladas por los océanos Atlántico y Pacífico, aunado a una amplia red fluvial lo que aumenta la vulnerabilidad a inundaciones (Grant et al., 2004). Una zona frecuentemente afectada es la Vertiente Atlántica, donde las actividades antropogénicas han promovido la deforestación en las partes altas y bajas de los ríos, debilitando la capacidad de retención de las cuencas, y aumentando así la frecuencia y capacidad destructiva de las descargas extremas en el río. A esto se le suma las secuelas del terremoto de Limón en el año 1991, el cual provocó una alteración geológica de las cuencas de la Vertiente Atlántica, modificando la dinámica tradicional y estabilidad de su cauce (Segura y Casasola, 2011).

2.2 Estudio hidrológico

Un estudio hidrológico es el análisis del ciclo hidrológico y su comportamiento en un espacio geográfico y en periodo de tiempo determinado y se compone de dos fases: la primera de ellas consiste en el análisis espacial que permite la determinación de las características

fisiográficas de la cuenca y la segunda consiste en el análisis de las variables hidrológicas que tienen lugar en la unidad espacial en estudio.

2.2.1 Fisiografía de la cuenca

La cuenca es un espacio geográfico cuyos aportes hídricos naturales son alimentados exclusivamente por la precipitación y donde los excedentes de agua convergen en un punto espacial único: punto de aforo. Este punto posee un determinado flujo anual, que se ve determinado por las condiciones climáticas locales y regionales, así como por el uso del suelo prevaleciente. Las características físicas de una cuenca desempeñan un papel esencial en el estudio y comportamiento de parte de los componentes del ciclo hidrológico, tales como la evaporación, infiltración, flujo superficial, entre otros. Las principales características físicas que se consideran en investigaciones hidrológicas son las concernientes a la cuenca, a la red de drenaje y al cauce o río principal. (Díaz, Mamadou, Iturbe, Esteller y Reyna, 1999)

2.2.2 Procesamiento y análisis de datos hidrológicos

El análisis hidrológico consiste en el procesamiento e interpretación de algunos modelos gráficos y matemáticos que estiman bajo un grado de probabilidad los caudales. Una crecida representa un aumento del caudal en comparación al flujo medio de la cuenca o río. En algunas ocasiones, este incremento llega a ser tan significativo, que podría inclusive, llegar a superar la capacidad del río para contener dicha cantidad de agua, provocando fuertes inundaciones (Aguilera, 2010). Las crecidas ocurren cuando las intensidades de las lluvias aumentan, además mantienen una fuerte relación con el tamaño y la topografía de la cuenca. Los estudios de crecidas máximas permiten, mediante la elaboración de mapas de inundación, detectar zonas con riesgo de inundación. Esta es información relevante para el diseño de estructuras hidráulicas y obras de protección. Una de las formas de obtener una modelación de crecidas máximas es por medio de modelos probabilísticos específicos para este tipo de variable. Estos modelos se basan en la consideración de que el caudal máximo anual es una variable aleatoria que tiene una cierta distribución (Villón, 2006). Entre ellos se encuentran los modelos: Gumbel, Log-Gumbel y Weibull, para lo cual se requiere contar con

bases de datos de caudales donde se puedan extraer los datos de avenidas máximas que puedan ser utilizadas por los métodos estadísticos mencionados y se puedan tener como resultado un comportamiento del río en diferentes escenarios de periodo de retorno.

2.3 Hidráulica de ríos

Una corriente fluvial, es una masa de agua que se desplaza debido a su energía potencial, desde puntos de mayor energía (mayor cota topográfica) a los de menor. Se denomina nivel de base el punto en que esta energía se anula (el mar, otro río, un lago). El agua del río, durante su desplazamiento, vence unos rozamientos externos e internos. La Figura 1, muestra la distribución de velocidades en una sección transversal del flujo. (García, 2012)

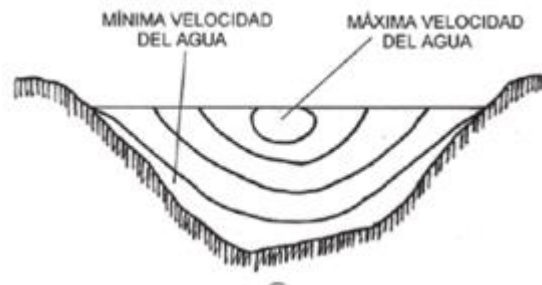


Figura 1. Distribución de isolíneas-velocidad

Fuente: (García, 2012).

Con la presencia de aluviones se deforma la superficie del lecho para formar ondulaciones, dunas, barras, en distintos sentidos, provocando alteraciones en su canal. Se puede decir que, en general, una corriente aluvial y su límite deformable experimentan una variedad de procesos fluviales, que conducen a la modificación en el perfil del río. Cualquier deformación inducida por el flujo de un canal lluvioso (o solo de su lecho) es por medio de la moción en masa por medio del transporte de sedimentos.

2.3.1 Modelación hidráulica

La modelación hidráulica se basa en principios físicos establecidos, sean estos los conceptos generales del análisis dimensional o sean aquellos obtenidos por el uso de ecuaciones empíricas en procesos específicos. La base de la modelación es la identificación de las

magnitudes predominantes en el fenómeno analizado, se complementa con una correcta selección de la escala y se finaliza con la interpretación de los resultados y su aplicación para obtener la solución del problema real, en donde deben considerarse los denominados “efectos de escala” (Castro et al., 2003).

En la modelación de ríos, los efectos gravitacionales y los viscosos son básicamente del mismo orden de magnitud. Por ejemplo, en flujos uniformes en equilibrio (es decir, flujos normales) la componente de fuerza gravitacional contrabalancea con exactitud la resistencia al flujo y las condiciones de flujo se deducen de las ecuaciones de continuidad y de momentum (Chason, 2002). En sí, la modelación de la propagación de avenidas en ríos busca resolver las ecuaciones del flujo variable del agua en lámina libre o ecuaciones de Saint Venant. Estas ecuaciones se deducen a partir de las leyes físicas de conservación que rigen el flujo de un fluido en general. Para un fluido incompresible e isótropo, como el agua, se obtienen las ecuaciones de Navier Stokes para el movimiento instantáneo, y de ellas se deducen, considerando variables medias en el tiempo, las ecuaciones de Reynolds (Bladé et al, 2009). Las ecuaciones de Saint Venant describen el movimiento del agua a superficie libre en un canal y son el resultado de aplicar los principios de la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento (Fuentes et al, 2001). A continuación, se indican las hipótesis básicas en las que se basan las ecuaciones de Saint Venant (Chow et al, 1994):

- El flujo es unidimensional e incompresible, es decir, con densidad constante.
- El tirante hidráulico y la velocidad del flujo varían sólo en la dirección del eje longitudinal del canal.
- La velocidad es uniforme y la superficie libre es horizontal a través de cualquier sección perpendicular al eje.
- Las líneas de flujo no tienen curvatura pronunciada, esto significa que el flujo varía gradualmente a lo largo del canal, de forma que las aceleraciones verticales puedan considerarse despreciables. Lo anterior implica que la distribución de presiones sea hidrostática.
- El fondo del canal es fijo y de pendiente pequeña, de modo que la profundidad del flujo y el tirante son aproximadamente idénticos, de tal suerte que los efectos de socavación y deposición son despreciables.

Las ecuaciones de Saint Venant sobre continuidad y de momentum se presentan a continuación:

$$\frac{\partial A}{\partial \tau} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f - S_o) = qV \dots\dots (2)$$

Donde:

A=área hidráulica (m²)

Q=gasto (m³/s)

V=velocidad media (m/s)

q=descarga lateral (m²/s)

y=tirante hidráulico

S_f=pendiente de fricción

g=gravedad (m²/s)

Las modelaciones hidráulicas pueden realizarse unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D). En los modelos en 1D se asume que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. Esta dimensión es la longitudinal a lo largo del eje del río o canal. La información topográfica e hidráulica se introduce mediante secciones transversales, en las cuales se calculan el tirante y velocidad promedios en toda la sección transversal. Es decir, toda la sección es representada por un único valor medio de velocidad, no considerándose variaciones en la distribución de velocidades tanto horizontal como verticalmente.

Los modelos 2D consideran las variaciones en las dos dimensiones del plano horizontal. Las variaciones de la velocidad u otra magnitud de interés en la columna vertical de agua se promedian y se asumen como un único valor. Son utilizados para describir fenómenos naturales como la inundación de una gran llanura de inundación, la confluencia de dos cauces, el flujo en un cauce ancho e irregular y en general todos aquellos sistemas en los cuales se presente un movimiento del flujo de agua en dos dimensiones. Para la resolución de las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones también se han utilizado los métodos

de las características, métodos en diferencias finitas, y métodos en elementos finitos, y además se ha utilizado la técnica de discretización en volúmenes finitos. Los esquemas numéricos clásicos en dos dimensiones, como los mencionados anteriormente, también sufren problemas de discontinuidades en la solución cuando se presenta flujo rápidamente variable (resaltos hidráulicos, frentes de onda, entre otros) por lo que en los últimos años se ha realizado un considerable esfuerzo para conseguir esquemas bidimensionales de alta resolución, como el método de los volúmenes finitos. Este método toma las ventajas tanto de las diferencias finitas como de los elementos finitos. Partiendo de la forma integral de las ecuaciones en forma conservativa, las discontinuidades se representan sin ninguna técnica especial a la vez que se conserva la masa y la cantidad de movimiento (Bladé & Valentín, 2006).

2.3.2 Estimación de parámetros en hidráulica fluvial

La resolución de un modelo hidrodinámico requiere datos sobre geometría, hidráulica y la aspereza del flujo. Los datos geométricos incluyen la longitud de la sección estudiada, su anchura, la forma, pero también la morfología del curso de agua:

- Red simple, ramificada, en malla, presencia de meandros,
- Datos hidráulicos en cuanto a nivel de agua, velocidad y flujo de caudal en las secciones aguas arriba y aguas abajo del cálculo,
- La rugosidad es un dato necesario en cada uno de los puntos de cálculo.

Dicha información rara vez está disponible y sigue siendo una realidad que las mediciones in situ siguen siendo un a menudo un procedimiento largo y costoso, a veces difícil de implementar y, desde un punto de vista práctico, no es posible medir los parámetros necesarios en todos los puntos de cálculo (Roux, 2004).

2.3.3 Plataformas de modelación

Entre muchas plataformas que existen para modelación hidrológica e hidráulica están: HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System), diseñado para

simular el proceso de precipitación-escorrentía de cuencas dendríticas. Este programa posee varios modelos matemáticos para simular la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración, la transformación de la precipitación neta, el flujo base y el tránsito hidráulico en canales abiertos. Para Joo Kjeldsen, Kim, y Lee (2013), el HEC-HMS se puede categorizar como un modelo conceptual agrupado, ya que representa el proceso de escorrentía de la cuenca por medio de un modelo de pérdidas agrupado el cual combina con un hidrograma unitario principalmente. Además, al ser un modelo conceptual, éste posee menos parámetros y requerimientos de entrada, en comparación con los modelos físicos totalmente distribuidos (Seibert y Vis, 2009). Según US Army Corps of Engineers (2013), el modelo se enfoca solamente en los componentes necesarios para predecir la escorrentía producto de una precipitación, al tiempo que los demás factores son omitidos o agrupados.

La plataforma IBER de modelado hidráulico utiliza la modelación matemática del flujo de agua en un río para predecir los valores que toman las variables hidráulicas (calado, velocidades, caudal, etc.) a partir de métodos numéricos para resolver ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis. Para el estudio de los efectos de la propagación de avenidas en ríos se pueden utilizar modelos unidimensionales o bidimensionales. La necesidad de estudiar cada vez fenómenos más complejos, y la observación que en la naturaleza se encuentran muchas situaciones donde el flujo parece ser efectivamente bidimensional -es decir, predominan las dimensiones horizontales sobre la vertical-, junto con la creciente capacidad y velocidad de los ordenadores, ha llevado al uso de ecuaciones y esquemas bidimensionales (ecuaciones de aguas someras). La herramienta IBER, combina un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos y utiliza el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones correspondientes. El resultado es una herramienta de modelización numérica del flujo de agua y sedimentos en ríos y estuarios, que utiliza esquemas numéricos avanzados especialmente estables y robustos en cualquier situación, pero especialmente adecuados para flujos discontinuos y, en concreto, para cauces torrenciales y regímenes irregulares.

2.4 Inundaciones

Una inundación corresponde a un evento el cual, debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay, ocasionando daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura (Salas y Jiménez 2014).

Según Desinventar (2014) los registros históricos evidencian que el 59,4% de los desastres naturales que ocurren en el país corresponden a inundaciones; sin embargo, otro porcentaje importante se asocia también a los eventos hidrometeorológicos, entendidos estos como: avenidas torrenciales, lluvias intensas, deslizamientos, vendavales, entre otros. La zona del Caribe del país es uno de los sectores que más comúnmente se sufren inundaciones por eventos hidrometeorológicos, causando fuertes daños estructurales, económicos. Los ríos y las quebradas que conforman la red fluvial en Matina son las principales áreas donde podrían llegar a ocurrir los desastres naturales, dicha red se encuentra constituida principalmente por:

- Río Matina
- Río Chirripó
- Río Barbilla
- Río Toro
- Río Zent
- Río Cuba
- Río Madre de Dios
- Quebrada Veinticinco
- Quebrada San José

El Cuadro 2 corresponde al registro histórico de inundaciones sufridas en la zona y sus principales consecuencias:

Cuadro 2. Registro histórico de las inundaciones y sus principales consecuencias en el cantón de Matina, Limón.

Fecha	Zona Afectada	Acontecimiento Ocurrido	Afectación hidráulica/humana	Fuente
19 Dic, 1800	Matina, Limón	Fuerte vientos y lluvias torrenciales durante toda la noche.Desbordamiento de ríos e inundaciones.	Pérdidas considerables	CNE. (2017). Histórico de desastres
Nov, 1828	Matina, Limón	Inundaciones por fuertes lluvias que provocaron el desbordamiento de los ríos Barbilla y Chirripó	Pobladores se desplazaron al interior del país y solo quedaron algunas personas al cuidado de las casas y fincas.	CNE. (2017). Histórico de desastres
25 Nov, 1969	Limón	Desbordamiento de ríos y quebradas	Vía férrea Atlántica afectada, servicio de trenes interrumpido. 60 familias evacuadas.	Vallejos, Esquivel & Hidalgo.(2012). Histórico de desastres en Costa Rica. C.N.E.
23 Nov, 1987	Limón	Inundaciones en la Estrella, Matina y Sixaola	Plantaciones y vías destruidas. 1600 personas evacuadas a albergues y 1 fallecida	Vallejos, Esquivel & Hidalgo, (2012). Histórico de desastres en Costa Rica. C.N.E.
11 Feb, 1988	Limón	Inundaciones en los ríos: Matina, Sixaola y Pacuare	Daños a cultivos y viviendas. Más de 3000 damnificados. Una persona fallecida	Vallejos, Esquivel & Hidalgo, (2012). Histórico de desastres en Costa Rica. C.N.E.
12 Dic, 1993	Limón, Matina, Siquirres, Talamanca, Sarapiquí, Pococí, Turrialba y Paraíso.	Lluvias intensas y derrumbes, Caribe y Valle Central.	Afectación en viviendas por inundaciones y deslizamientos.	CNE. (2017). Histórico de desastres
Nov, 1999	Limón, Matina, Talamanca, Siquirres, Guácimo, Pococí, Turrialba, Paraíso, Jiménez y Sarapiquí.	Fenómenos hidrometeorológicos en la Zona Atlántica.	Daños en Agricultura, principalmente en plátano y banano. Infraestructura vial dañada.	CNE. (2017). Histórico de desastres
11 Ene, 2002	Limón	Lluvias en la vertiente del Caribe producto por un frente frío.	227 personas evacuadas en albergues. Daños en el muelle Moín y pérdidas por exportación de banano.	Desconocido. (11 de enero de 2002). Matina Sitada por agua. <i>La Nación</i> .
5 May, 2002	Limón	Desbordamiento de los ríos: Matina, Bananito, Sixaola, la Estrella	Sin registro	Vallejos, Esquivel & Hidalgo, (2012). Histórico de desastres en Costa Rica. C.N.E.

11 May, 2004	Limón	Inundación en los cantones Limón: Matina y Liverpool	1543 damnificados, 2 muertos, 182 viviendas afectadas, 32 puentes con daños estructurales y 5 diques con problemas de erosión.	Desconocido. (11 de mayo de 2004). Dos muertos, 1543 damnificados y 182 viviendas dañadas por lluvia. <i>La Nación</i> .
10 Ene, 2005	Sixaola, Matina, Siquirres, Valle de la Estrella, Talamanca y Sarapiquí	Inundaciones producidas por las lluvias que afectan al Caribe costarricense.	Pérdida de casi 2 millones de dólares en daño a la infraestructura, destrucción de 13 puentes y daño a 10 tramos de la carretera. 5500 personas en albergues y 5 desaparecieron.	Desconocido. (10 de enero de 2005). Cinco desaparecidos y trece puentes colapsados en el Caribe. <i>La Nación</i> .
19 Nov, 2008	Siquirres, Matina y Limón centro	Aumento descontrolado del caudal de los ríos producto de las fuertes lluvias (frente frío) Inundaciones vertiente del Caribe, por interacción de una alta y baja presión	55,760 personas afectadas y alrededor de 6096 personas trasladadas a albergues afectaciones de la infraestructura vial, las comunicaciones, la agricultura, los servicios públicos y las viviendas.	CNE. (2017). Histórico de desastres
10 Jul, 2014	Matina, Siquirres, Guácimo de Limón	Aumento de la presión atmosférica en el mar Caribe, lo cual provoca fuertes lluvias.	Vías de acceso y puentes deteriorados por el exceso de agua. Al menos 20 viviendas afectadas.	Loaiza, V. (10 de julio del 2014). Fuertes lluvias provocan inundaciones en Limón. <i>La Nación</i> .
20 Jun, 2015	Limón; Matina; Siquirres; Talamanca; Guácimo; Pococí; Turrialba; Sarapiquí.	Inundaciones producto de temporal lluvioso y el paso de un sistema de baja presión.	1,010 personas trasladadas a albergues temporales. 3,395 viviendas afectadas, 247 tramos de vías interrumpidos, 63 puentes con daño en su estructura, 48 acueductos rurales con daños, 832 centros educativos con suspensión de servicios. Daños en al menos 5,204 hectáreas de terrenos sembrados.	CNE. (2017). Histórico de desastres
27 Jun, 2015	Siquirres, Matina, Limón, Talamanca, Valle de la Estrella y Turrialba	Desbordamiento de los ríos: Pacuare y Reventazón	160 personas evacuadas a albergues. Daños en viviendas, puentes y carreteras (Ruta 32), canales que evacúan aguas de los ríos están desbordados	Desconocido. (27 de junio de 2015). Alerta roja por inundaciones en el Caribe tras fuertes lluvias. <i>La Nación</i> .
15 Ene, 2018	Matina: Batán	Desbordamientos de los ríos en el Caribe debido a la influencia de un frente frío	Caídas de árboles, daños a los techos de las viviendas, 22 personas ubicadas en albergues.	Jiménez, E & Montero, R. (15 de enero de 2018). Ruta 32 tendrá cierres preventivos por mal tiempo. <i>La Nación</i>
16 Ene, 2018	Comunidades de Matina: Cuatro Millas, Camalaberta	Fuerte frente frío que provocó un aumento exagerado de las lluvias	Pérdida de la red de comunicación, 418 personas evacuadas en albergues.	Matarrita, M; Ordoñez, M& Mora, N. (16 de enero de 2018). 65 personas atrapadas por terrible inundación en Matina. <i>La prensa libre</i>

2.5 Transporte de Sedimentos

El transporte de sedimentos en un río se divide usualmente en tres formas: desprendimiento del fondo, saltación y suspensión. El desprendimiento del fondo se refiere al movimiento de las partículas ya sea por arrastre o al rodar a lo largo del fondo del canal. Saltación es cuando las partículas saltan sobre el fondo una distancia proporcional a su diámetro. Y la suspensión es cuando el flujo es lo suficientemente intenso que las partículas se mueven sobre el fondo perdiendo contacto con éste.

Al contrario de las aguas de un río, cuyo contenido en elementos es generalmente homogéneo, los sedimentos presentan heterogeneidades. Para Ortiz y Roser (2006): “Los sedimentos fluviales activos se obtienen a partir de la erosión de las distintas litologías presentes en la cuenca que es drenada y principalmente, del material precipitado”. El transporte o carga de sedimentos de una corriente consta de dos tipos definidos con base en el tamaño de las partículas y la forma de movimiento; el primero se denomina sedimento en suspensión, que es el material fino mantenido en el tirante o lámina de agua por efecto de la turbulencia de la corriente o en suspensión coloidal. El segundo se conoce como transporte de fondo, es el material grueso que se mueve continuamente o de manera intermitente por rodamiento o saltación. Generalmente, varía del 5 al 35% del transporte en suspensión. (Morris y Fan, 2009).

De acuerdo con Shepard (1954): “El tamaño de grano es una propiedad fundamental del sedimento, siendo muy usada para clasificar ambientes sedimentarios puesto que juega un papel principal en el transporte y deposición de material granular”. El análisis métrico del sedimento es conocido comúnmente como análisis granulométrico. La toma de muestras granulométricas en ríos es uno de los puntos de partida en cualquier estudio sobre dinámica fluvial. Los resultados obtenidos a partir de la granulometría son posteriormente utilizados en el cálculo del transporte de sedimento en un río serie de datos importantes que aportan a conocer a dinámica del cauce y a partir de esto, el diseño de obras hidráulicas.

2.4.1 Modelación de transporte de sedimentos

La modelación de sedimentos es importante para estudiar los cambios morfológicos en ríos; la erosión, transporte y deposición de sedimentos contaminados; para optimizar el dragado de ríos; en la gestión de sedimentos en embalses y zonas de inundación; y para la restauración del río a través de un diseño óptimo de las obras a realizar en él (DHI, 2004). La combinación del componente hidrodinámico y de transporte de sedimentos permiten la creación de un sistema dual, en el cual se puede modelar con mayor precisión variables importantes, por ejemplo: profundidad del flujo, descarga del flujo y grosor de la capa de sedimentos (Castro et al., 2008). Existe gran variedad de modelos que permiten el análisis unidimensional, bidimensional y de transporte de sedimentos, unos más especializados que otros, dentro de los cuales se encuentran Flo-2D, Hec-GeoRAS, Telemac-Mascaret, IBER, entre otros.

Desde el punto de vista del modelado hidráulico, estos modelos son utilizados como herramientas para el planeamiento y diseño de infraestructuras, así como para realizar pronósticos con el objetivo de implementar medidas de mitigación. A esto se le suma el modelado de transporte de sedimentos en cauces, el cual ha tomado relevancia en las últimas décadas debido, entre otros, al inadecuado uso que se le ha dado al suelo y a la deforestación reflejado en una disminución o ausencia de técnicas conservacionista de suelos, lo cual ha promovido la erosión hídrica del suelo y consecuentemente un aporte importante de sedimentos en los cauces, incrementando la vulnerabilidad de ecosistemas y pueblos cercanos a los ríos.

III. METODOLOGÍA

3.1 Descripción del área de estudio

El Río Matina inicia en la confluencia del Río Chirripó y el Río Barbilla y termina en la desembocadura en el mar Caribe. Sin embargo, la cuenca completa abarca el complejo de los ríos Chirripó – Matina y se ubica en la provincia de Limón, perteneciente a la Vertiente Atlántica de Costa Rica (Figura 2). Su área de drenaje es de aproximadamente 1.619,40 km² lo que corresponde a un 3,17% de la superficie nacional y está comprendida entre las coordenadas planas de 163.000 - 238.400 latitud norte y 576.500 - 633.700 de longitud oeste. Es una cuenca que presenta una estación lluviosa a lo largo de casi todo el año, con disminución en lapsos cortos sin precipitación en los meses de marzo y setiembre.

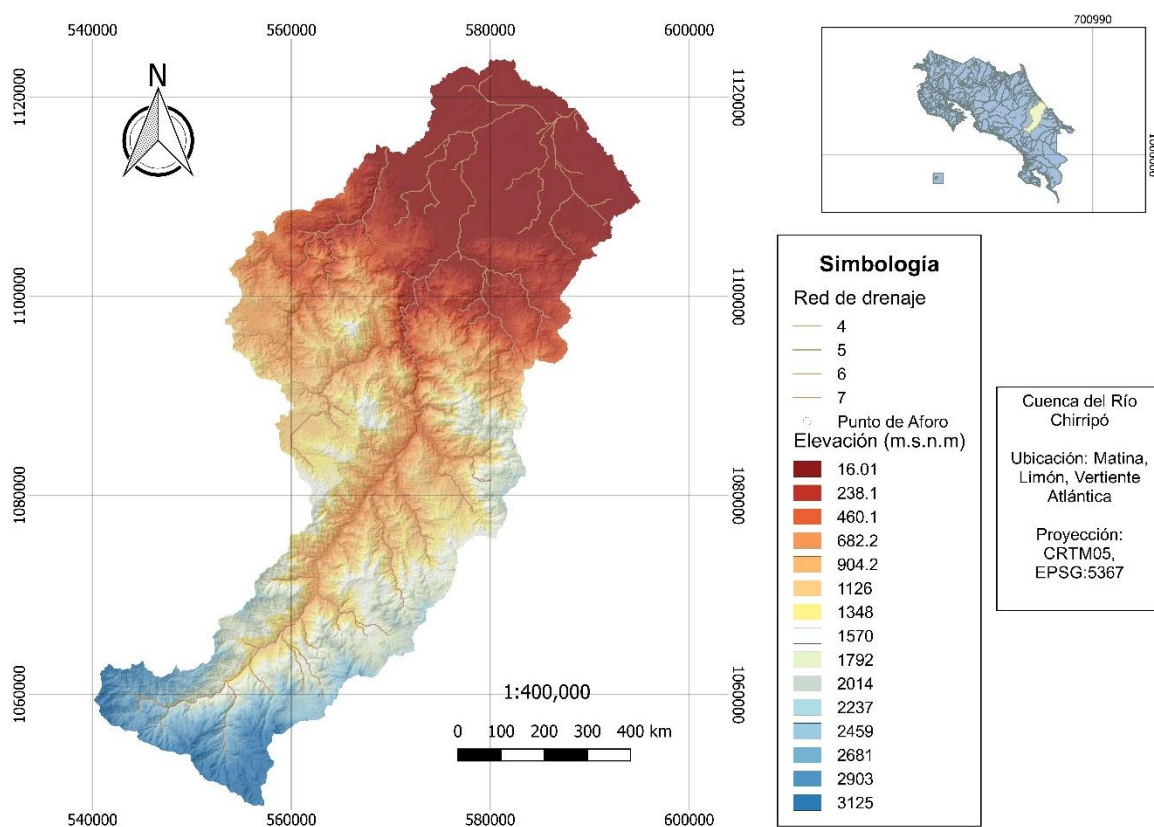


Figura 2. Cuenca del río Chirripó, ubicada en la provincia de Limón, Costa Rica.

3.2 Estudio hidrológico de la cuenca

3.2.1 Análisis de caudales

El análisis de caudales se hizo mediante la modelación matemática utilizando los modelos probabilísticos de Gumbel, Log-Gumbel y Weibull. La base de datos utilizada fue suministrada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), donde se incluye información de niveles en tres estaciones de medición, tal como lo muestra la Figura 3, donde la ubicación de las estaciones corresponde a los siguientes nombres:

- 06-02: Barbilla (Periodo: 1977-1994)
- 06-06: Quebrador (Periodo: 1991-1993)
- 06-03: Playa Hermosa (Periodo: 1981-1995)

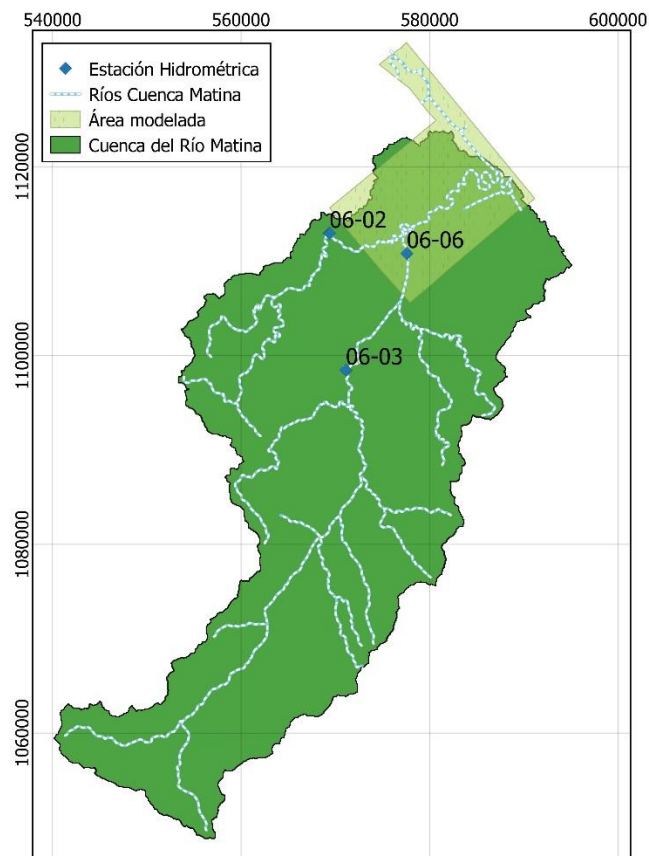


Figura 3. Ubicación de estaciones limnigráficas sobre tres afluentes del río Matina.

Los siguientes modelos utilizados, fueron aplicados para generar los caudales en escenarios de periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 75 y 100 años.

1. **Distribución Weibull:** Distribución gráfica desarrollada por Weibull (1939), a partir de la cual se logró predecir eventos máximos de caudal en función del período de retorno Tr , de dichos eventos. Para su aplicación se arregló el registro de todos los caudales máximos la estación en estudio en orden decreciente, a su vez se asignó a cada dato un número de orden m , que va desde el número 1 hasta un valor n , que representa el tamaño de la muestra, seguidamente se estimó el período de retorno mediante la Ecuación (3) y se generaron los caudales mediante la Ecuación (4).

$$Tr = \frac{(n+1)}{m} \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

Tr : periodo de retorno (años)

n : número total de datos del registro

m : número de orden

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots (4)$$

Donde:

$F(x)$: función de distribución acumulada

x : valor de la variable a analizar

η : parámetro de escala

β : parámetro de forma

2. **Distribución Gumbel:** Con la distribución de valores extremos formulada por Gumbel (1941), se aplicó la función de distribución acumulada (Ecuación 5) de manera que, para cada uno de los escenarios de periodo de retorno previamente establecidos, se obtuvo una probabilidad que permitiera finalmente hacer el despeje del caudal correspondiente a cada periodo de retorno.

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{(x-\mu)}{\alpha}}} \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

F(x)= función de distribución acumulada para $-\infty < x < \infty$

x= valor de la variable a analizar

μ = parámetro de posición

α = parámetro de escala

3. **Distribución Log-Gumbel:** Se utilizó el arreglo de la distribución log-Gumbel, de igual manera sobre la función de distribución acumulada (Ecuación 6) con el fin de analizar un modelo adicional y contar con más información en el momento de decidir el modelo a utilizar para los escenarios.

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{-(\ln x - \mu)}{\alpha}}} \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

F(x)= función de distribución acumulada para $-\infty < x < \infty$

x= valor del logaritmo natural de la variable a analizar

μ = parámetro de posición

α = parámetro de escala

Se seleccionó el modelo que mejor representa las condiciones reales de flujo y a partir de ahí se generaron los hidrogramas para cada periodo de retorno que serán utilizados en la modelación hidráulica, con entrada en el afluente del río Barbilla y río Chirripó.

3.3 Estudio hidráulico del río Matina

3.3.1 Geometría y mallado

Una vez obtenidos los datos de caudales mediante la modelación probabilística, se crearon los insumos de pre-proceso para generar la modelación bidimensional. Inicialmente, la geometría (Figura 4) se realizó separando las zonas en donde se requiere mayor definición y enfoque en el estudio, contemplando principalmente ancho del cauce, topografía, zonas de cultivo y vulnerabilidad. Se utilizó, en la etapa de mallado, el tipo de malla no estructurada la cual puede ser utilizada para áreas irregulares. Se utilizaron 4 tipos de tamaños 5 m para diques, 15 m para canales de drenaje, 25 m para cauce del río y 50 m para el resto del área. La Figura 4 muestra también las áreas con su respectivo tamaño de malla.

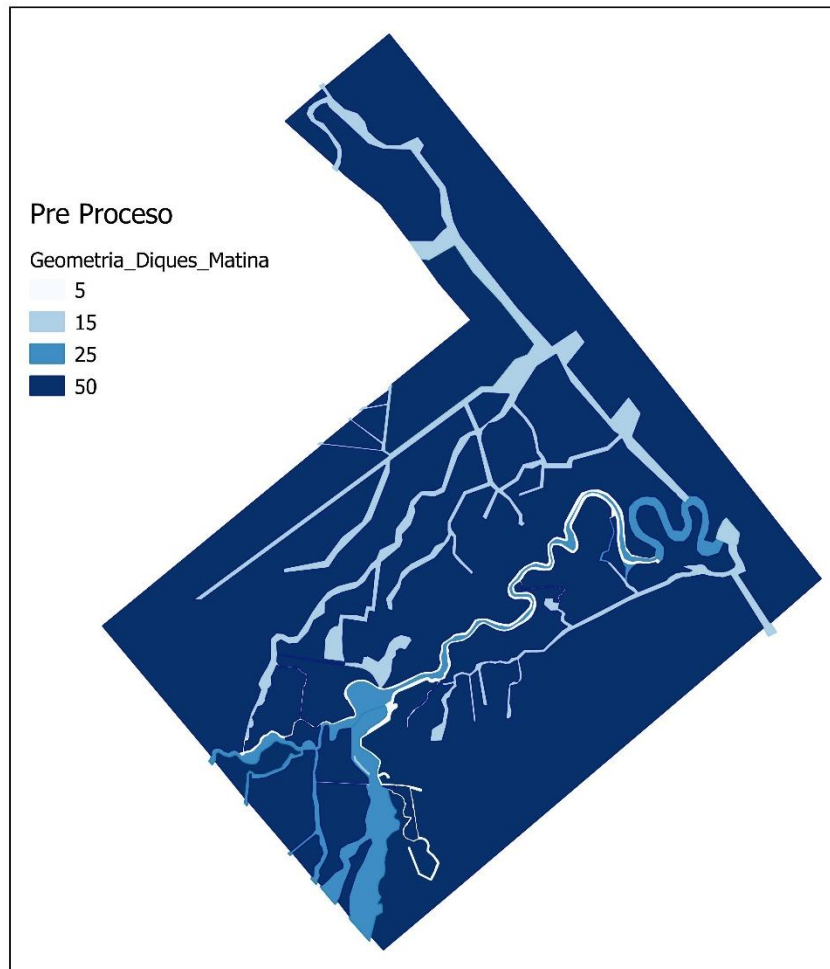


Figura 4. Base geométrica y mallado utilizados en la modelación mediante IBER

3.3.2 Rugosidades

Para obtener los coeficientes de Manning, mediante el software QGIS, se realizó la clasificación de uso de suelo, dividiendo el área en: bosque, calle, cauce, cultivo, mixto, pasto y techo. Por medio de un archivo ráster, los valores fueron asociados al número que corresponde al tipo de cobertura. Obteniendo esos productos en el software IBER se crearon las rugosidades y los coeficientes de los cauces (Figura 5).

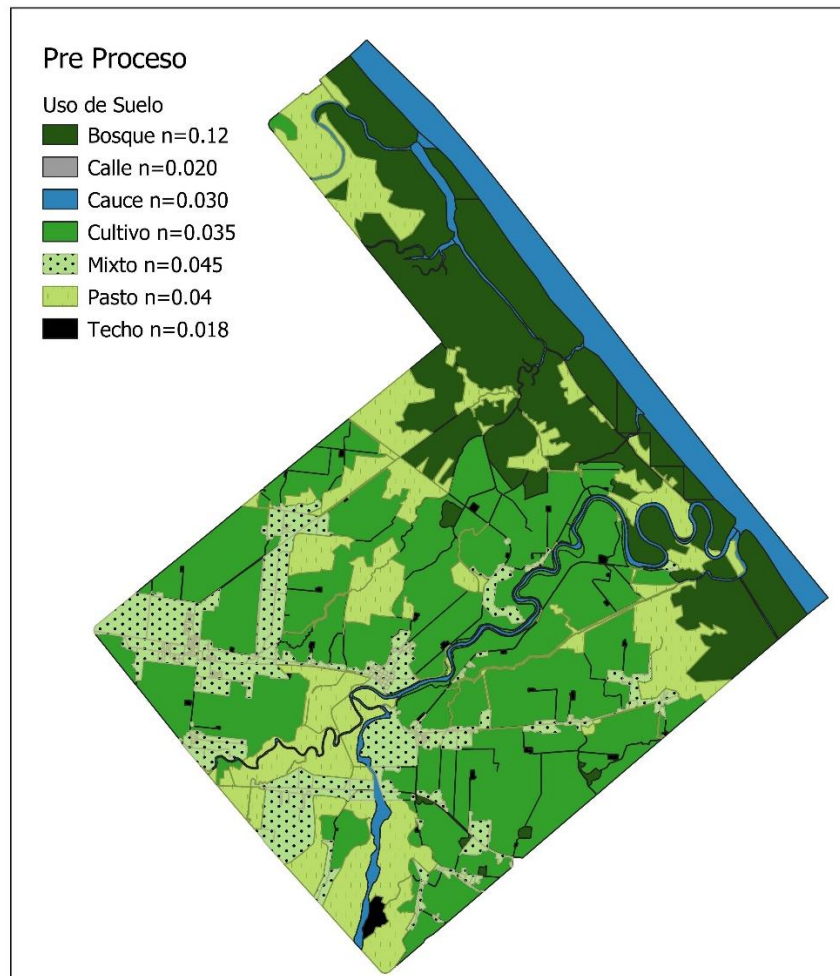


Figura 5. Mapa de uso de suelo del área a modelar.

3.4 Transporte de sedimentos

3.4.1 Muestreo de sedimentos

La etapa de caracterización inició con la recolección de datos de campo de sedimentos de fondo, suspensión y bancos. Las muestras de material se tomaron desde estructuras como

puentes, en bote y en los bancos en ambas márgenes del río. Tanto los sedimentos de fondo de cauce, como los de suspensión, se tomaron con la ayuda de un equipo especializado obtenido por la Escuela de Ingeniería Agrícola de investigaciones anteriores. Asimismo, se hizo el conteo y medición de muestras de material en el sitio para lo correspondiente a la caracterización de los bancos del río.

3.4.2 Ubicación de los puntos de muestreo

Se definieron diez puntos de muestreo (Figura 6), dos de ellos sobre el Río Chirripó en donde se realizaron mediciones en sitio y ocho sobre el Río Matina con recolección de muestras. A partir de los datos generados, se construyeron las curvas granulométricas para cada uno de los puntos, permitiendo determinar valores diámetros característicos o medios (D50), los cuales se extrapolaron entre punto y punto a lo largo del cauce.

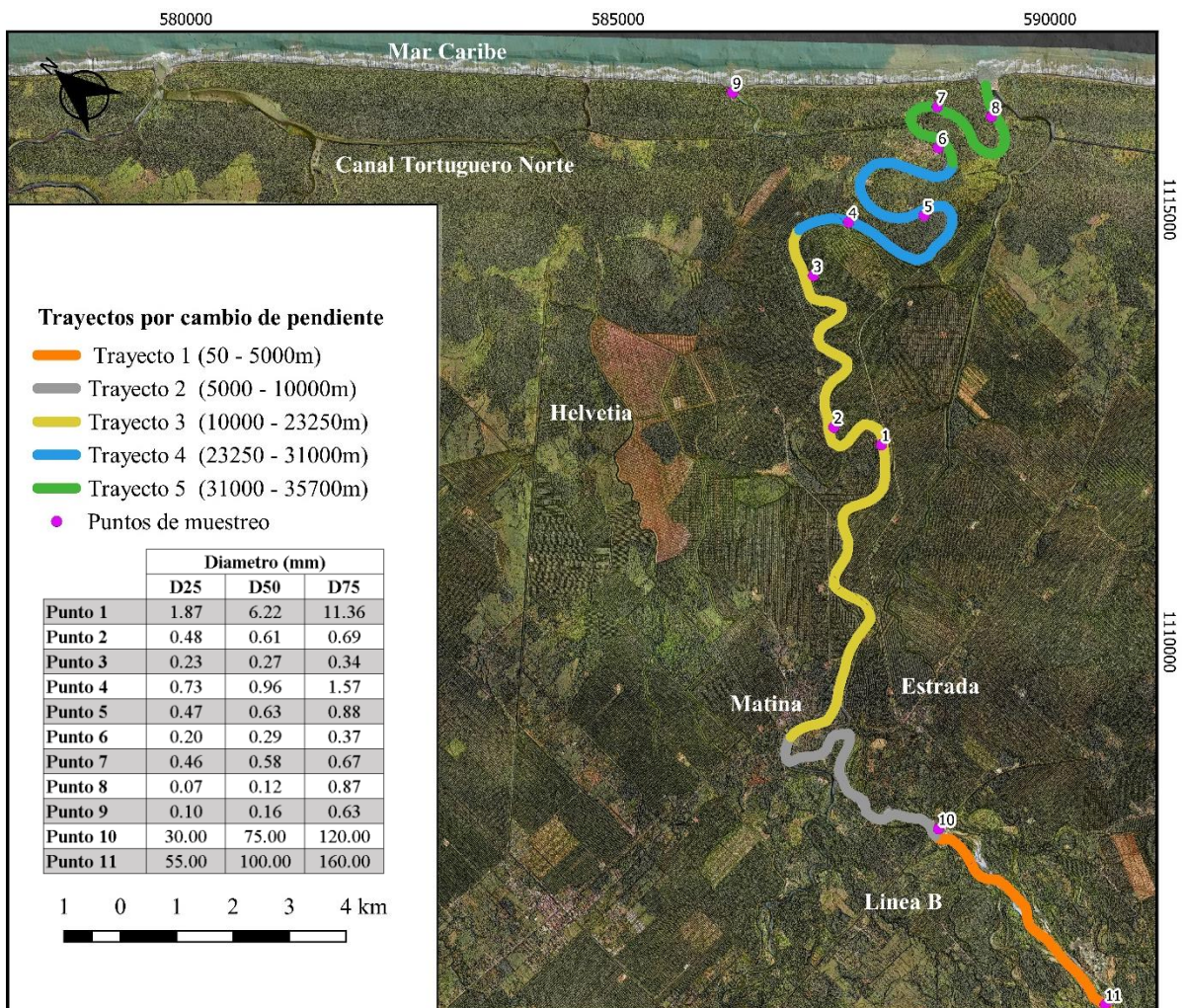


Figura 6: Puntos de recolección de muestras de material del fondo del cauce.

Se utilizó el D50 para realizar el modelamiento de transporte de sedimentos de fondo, la ecuación utilizada es la de Meyer, Peter y Muller.

$$Q_B = 8 D_m^{1.5} g^{0.5} \Delta^{0.5} b \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{1.5} \left(\frac{d_m S}{\Delta D_m} \right) - 0.047 \right]^{1.5} \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

Q_B = es arrastre en la capa de fondo, en toda la sección (m³/s)

$D_m^{1.5}$ es diametro medio (D50) del material del fondo del cauce (m).

n = rugosidad del tramo en estudio.

n' = La rugosidad debida a las partículas, definida por $\frac{(D_{90})^{\frac{1}{6}}}{26}$ pa D_{90} en (m)

b = Ancho medio del fondo del cauce (m)

d_m = Tirante medio (m), definido por A/B , A es área hidráulica en (m²)

B = Ancho de la superficie libre de agua (m).

Δ = Densidad relativa de las partículas sumergidas.

S = Pendiente del cauce del tramo en estudio.

3.4.3 Análisis de muestras de sedimentos

Los sedimentos obtenidos (de fondo, suspensión y de los bancos) fueron analizados en el laboratorio. Los sólidos en suspensión se dejaron reposar por al menos 3 semanas, y luego se separaron los sólidos de los líquidos. Los sólidos fueron secados a 105° C y se determinó el peso del suelo seco. Conociendo el volumen de la muestra, se pudo determinar la concentración de sedimentos en suspensión. Los sedimentos de fondo recibieron el mismo tratamiento de secado. Y para ambos sedimentos, se determinó luego la distribución de partículas para una posterior clasificación y estudio de transporte de sedimentos.

Los resultados de sedimentos obtenidos en el laboratorio alimentaron las bases de datos para el análisis estadístico de los sedimentos presentes en el río y para la adecuada caracterización de los sedimentos. Esto permitió la evaluación de las ecuaciones de transporte de sedimentos para las condiciones de flujo del río Matina. La granulometría ayudó a asociar los diámetros medios de arrastre de los sedimentos con respecto a los volúmenes presentes en el río. Y además permitió obtener las curvas de distribución del material.

En la literatura existen muchas ecuaciones que explican el transporte de sedimentos, se seleccionaron algunas de ellas para ser evaluadas con los datos de diámetro y caudal del río e identificar así la que explica mejor la dinámica de los sedimentos en este caso, misma que se incluyó en el modelo de transporte de sedimentos junto con los datos hidráulicos del río Matina.

3.4.4 Modelación de transporte de sedimentos

La modelación en dos dimensiones requirió una base de mallado con una escala adecuada para incluir las entradas de fuentes de sedimentos. El modelo muestra velocidad y profundidad del agua, profundidades de erosión-deposición, esfuerzo cortante del fondo, diámetro medio de sedimentos, concentración de sedimentos, elevación del fondo, el número de Froude a determinados intervalos; y la curva de distribución de sedimentos en puntos específicos. Todas las modelaciones llevaron una etapa de corrección o mejoramiento de inconsistencias (calibración) de las secciones transversales calculadas y una posterior validación bajo el escenario de 25 años de periodo de retorno.

La modelación del transporte de fondo, requiere de las condiciones de borde aguas arriba, las cuales corresponden a los valores medios anuales de carga de sedimentos, sin embargo, no se incluyó un caudal sólido de entrada (material arrastrado desde aguas arriba), dado que no se contó con registros que permitieran la estimación del material de ingreso. Posteriormente, se realizó el análisis de las pendientes del cauce principal del Río Chirripó y Río Matina como se puede ver en la Figura 7, con el fin de definir el número de trayectos del cauce para la modelación de transporte de fondo. El evento modelado corresponde al escenario de 25 años de periodo de retorno, debido a que es un evento que genera desbordamientos en las partes altas, produciendo que el caudal confinado al cauce y diques no cambie significativamente, un aumento en el periodo de retorno generaría mayor caudal de desbordamiento, manteniendo relativamente constante el que corre por el cauce.

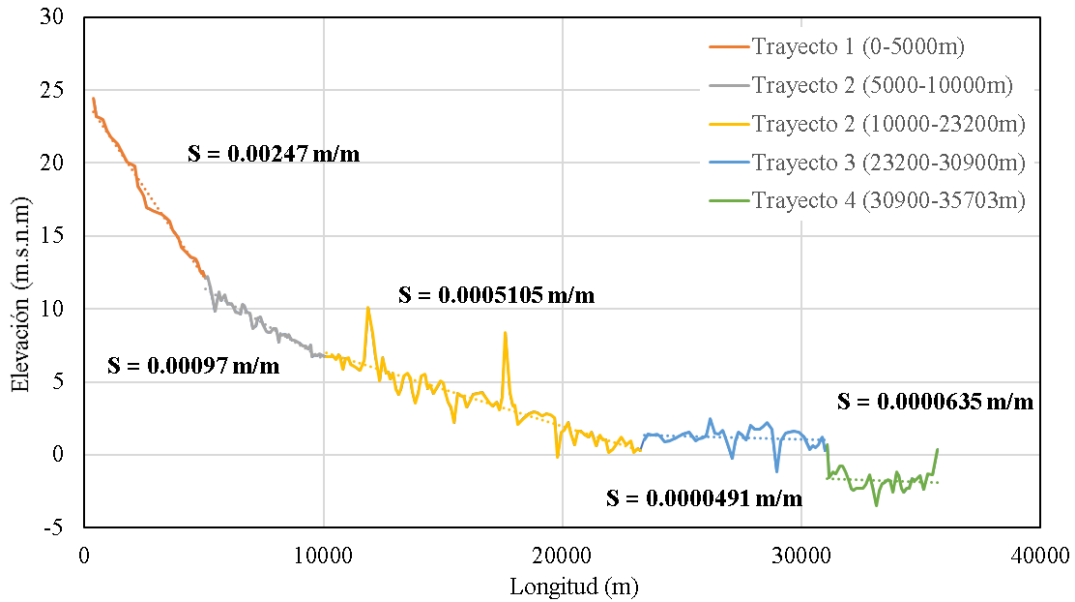


Figura 7. Pendientes del cauce del río Chirripó y Matina

Se delimitaron tres grandes segmentos en función de la pendiente para modelar el transporte de fondo: el Trayecto 1 utilizando un D50 de 75 mm (MTF1), el Trayecto 2 utilizando un D50 de 50 mm (MTF2) y se agrupó el Trayecto 3 y el Trayecto 4 hasta el punto donde finaliza el sistema de diques (MTF3).

En la etapa de preproceso se definieron las condiciones hidrodinámicas de contorno, los hidrogramas de entrada de caudal líquido correspondientes al $Tr = 25$ para las secciones de inicio de los modelos MTF2 y MTF3, para el modelo MTF1 se utilizó el hidrograma calculado en el análisis hidrológico, dado que tiene la misma entrada que el modelo hidráulico, de igual forma se hizo con las condiciones de salida de MTF1, MTF2 y MTF3, extrayendo las elevaciones de los niveles de agua del modelo hidráulico, en las secciones en que finaliza cada uno de los modelos, definiendo la salida como un nivel conocido.

IV. RESULTADOS

4.1 Análisis de Caudales

Como producto de la modelación estadística aplicada al registro de caudales, se obtuvo la curva de caudales en relación con el periodo de retorno para cada uno de los tres modelos utilizados. Estas curvas se pueden observar en la Figura 8, sin embargo, se seleccionó el modelo de la distribución Weibull para la modelación hidráulica debido a que es la que representa mejor la realidad de los eventos que se han presentado en el registro histórico.

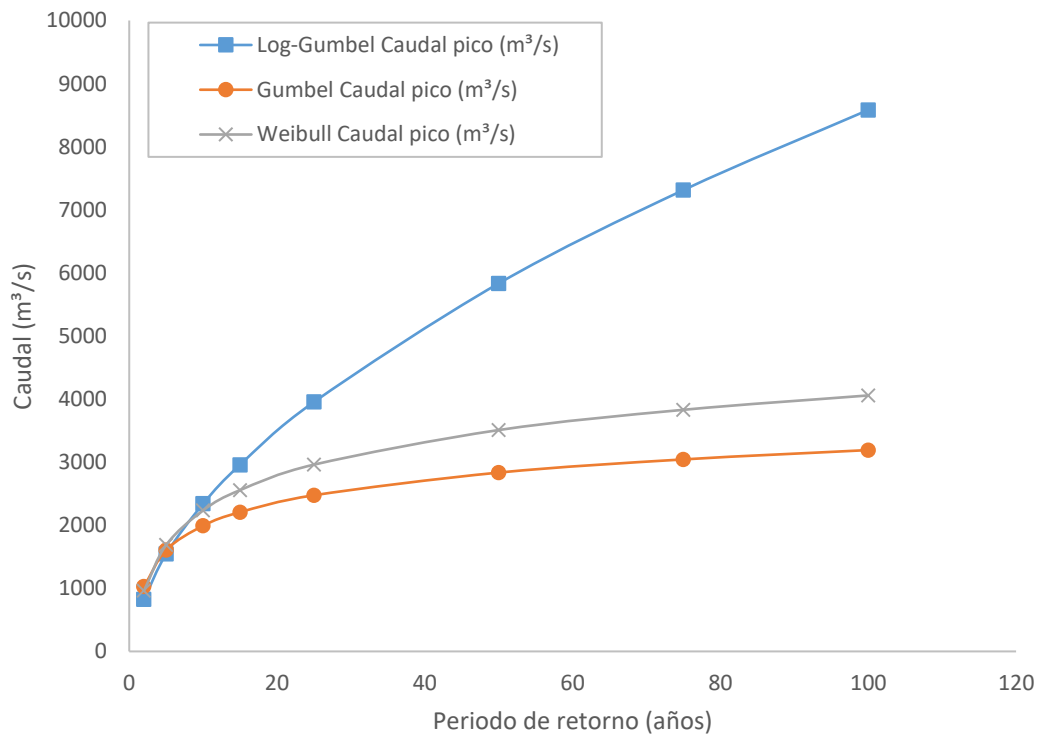


Figura 8. Caudales generados para diferentes periodos de retorno.

Bajo el modelo seleccionado, se generaron los hidrogramas para cada periodo de retorno que se utilizaron para la modelación hidráulica, los cuales se muestran en las Figuras 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

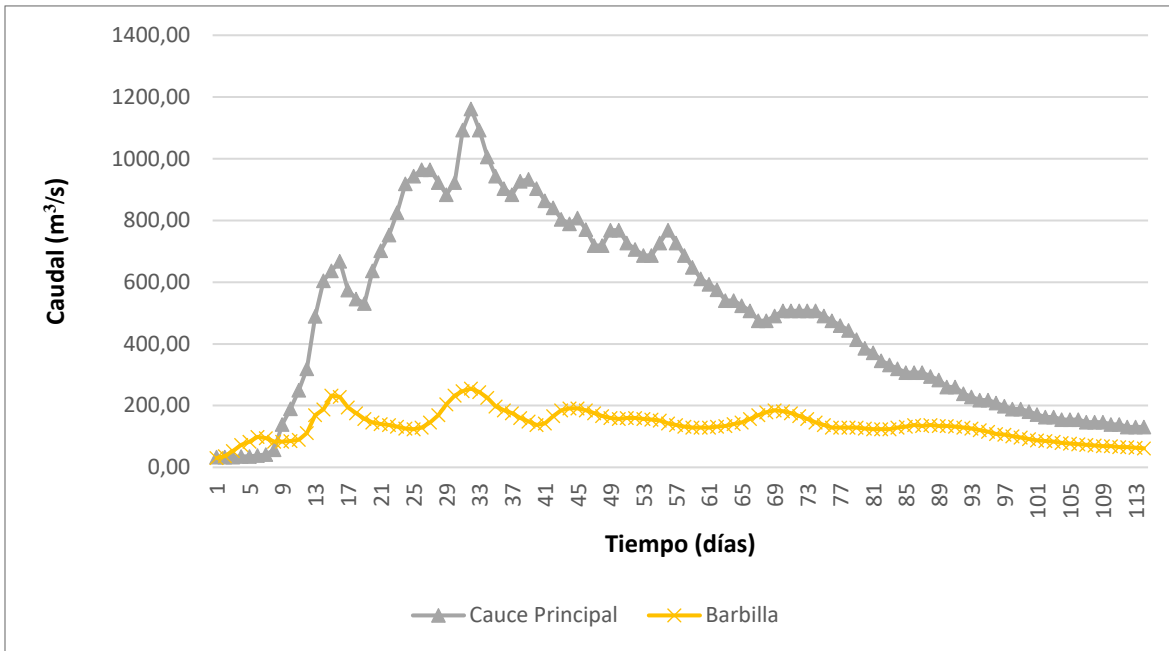


Figura 9. Hidrogramas del cauce principal y afluente de río Barbilla para un Tr=5 Años

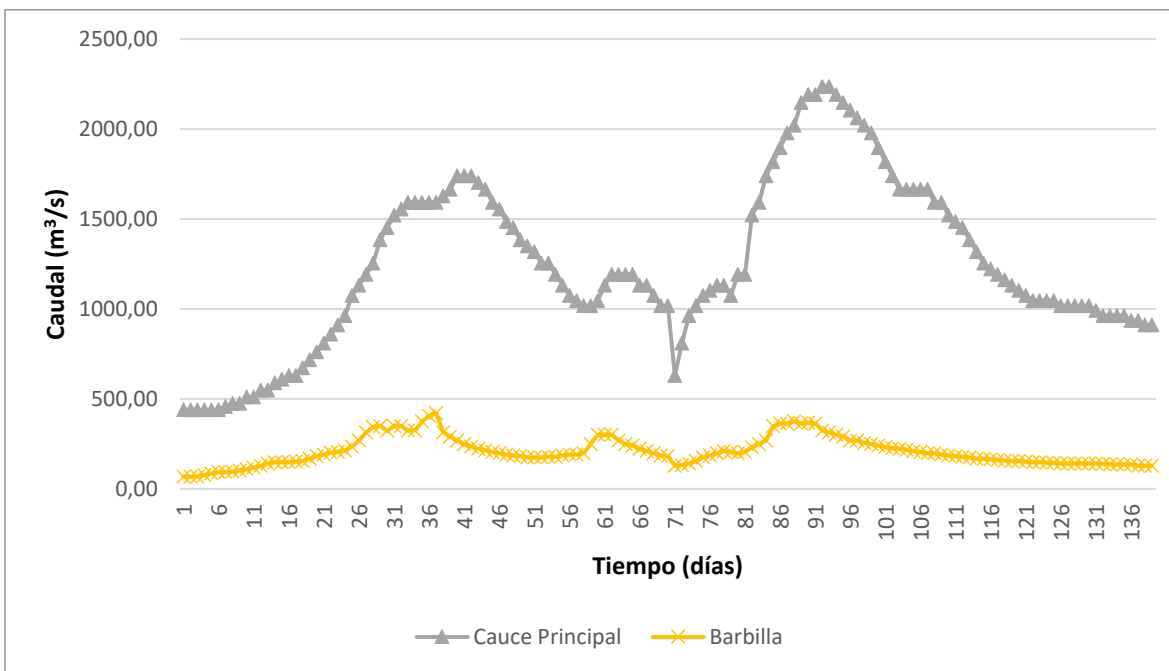


Figura 10. Hidrogramas del cauce principal y afluente de río Barbilla para un Tr=10 Años

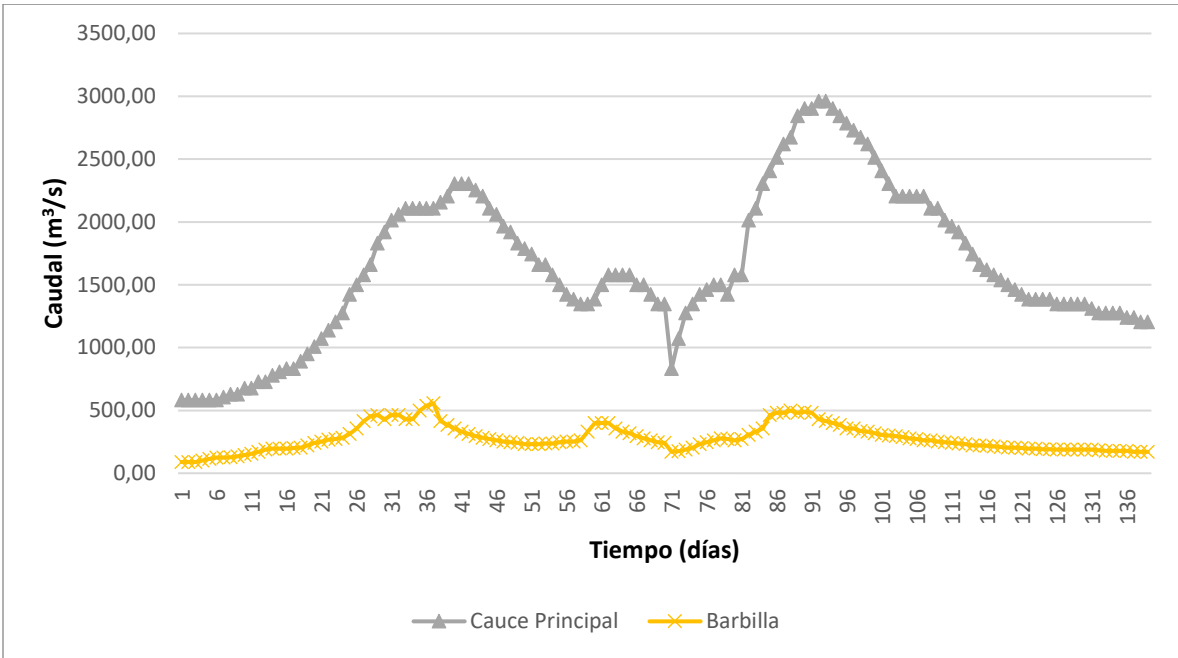


Figura 11. Hidrogramas del cauce principal y afluente de río Barbilla para un Tr=25 Años

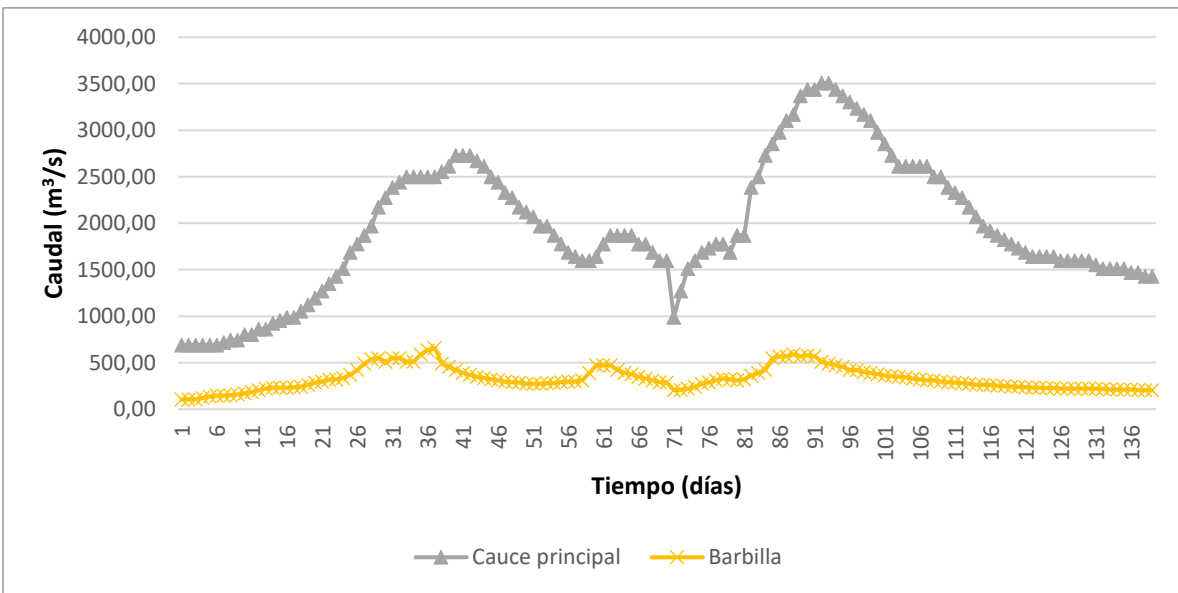


Figura 12. Hidrogramas del cauce principal y afluente de río Barbilla para un Tr=50 Años

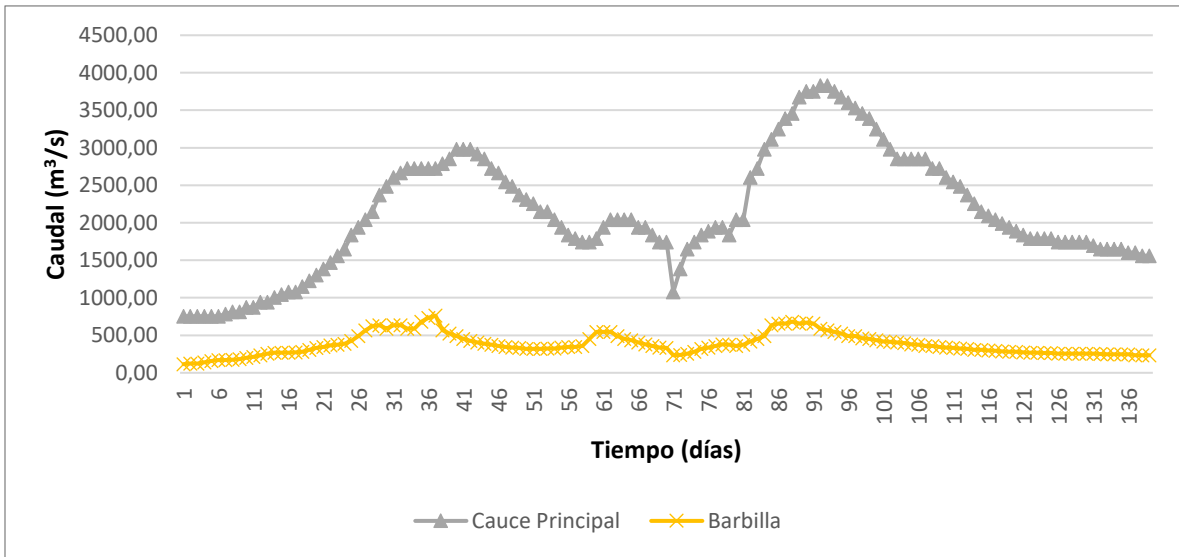


Figura 13. Hidrogramas del cauce principal y afluente de río Barbilla para un $Tr=75$ Años

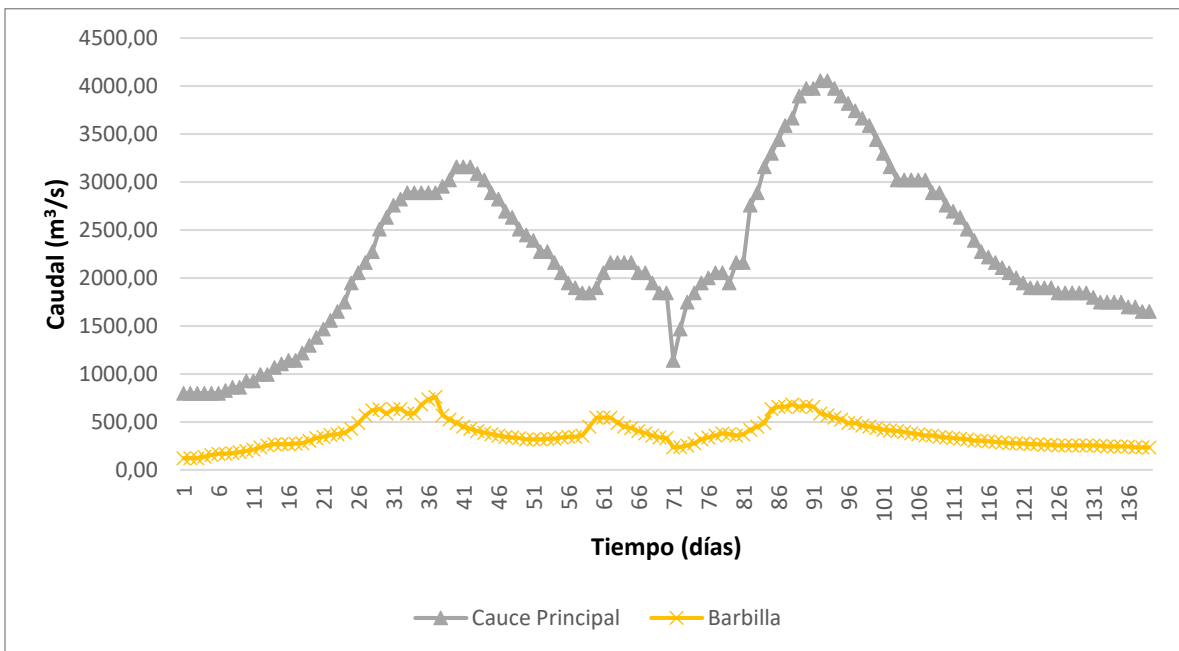


Figura 14. Hidrogramas del cauce principal y afluente de río Barbilla para un $Tr=100$ Años

4.2 Manchas de Inundación

Los escenarios modelados con los programas IBER responden a crecidas calculadas para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 75 y 100 años. Los cuales son útiles para el diseño de obras, que según sus características responderán a una probabilidad de caudal de excedencia específica. Además, la cantidad de información que se puede extraer de los modelos realizados tiene un gran rango de acción; ordenamiento territorial, diseño y construcción de obras de defensa, extracción de materiales, generación de manchas de inundación, áreas de vulnerabilidad, manejo agrícola, sistemas de alerta temprana entre otros.

4.2.1 Periodo de retorno 5 años

En las Figuras 15 y 16 se observa el escenario de comportamiento del río Matina bajo una crecida con un periodo de retorno de 5 años. En la Figura 15 se indica la mancha de humedecimiento según la profundidad del agua sobre la superficie del suelo y en la Figura 16, se muestra la velocidad del flujo en el cauce. En este escenario puede apreciarse cómo los puntos de mayor vulnerabilidad se concentran en dos puntos importantes, el primero de ellos en la confluencia de los ríos Chirripó y Barbilla y el segundo en la parte más cercana a la desembocadura.

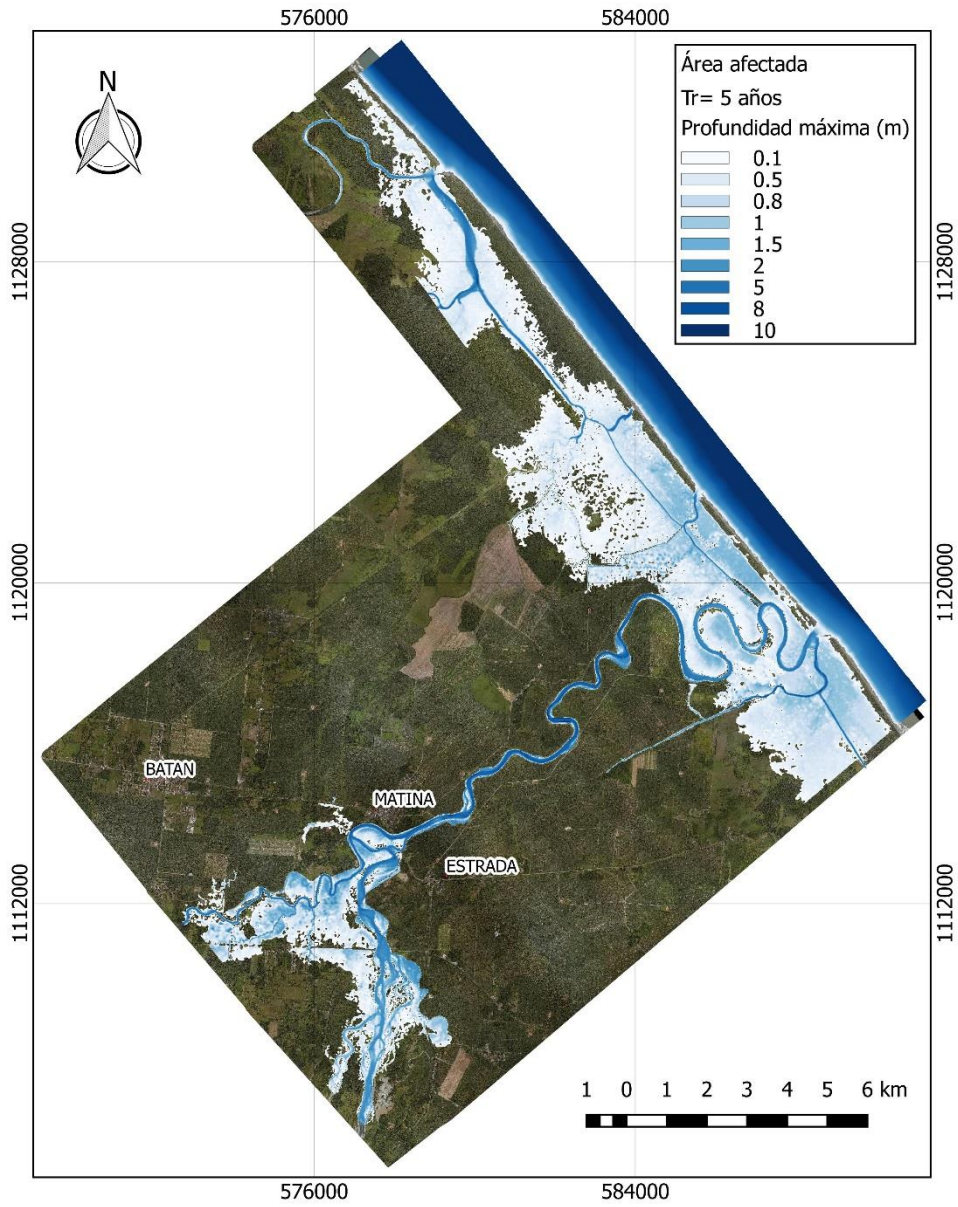


Figura 15. Escenario de profundidad de agua para una avenida de Tr=5.

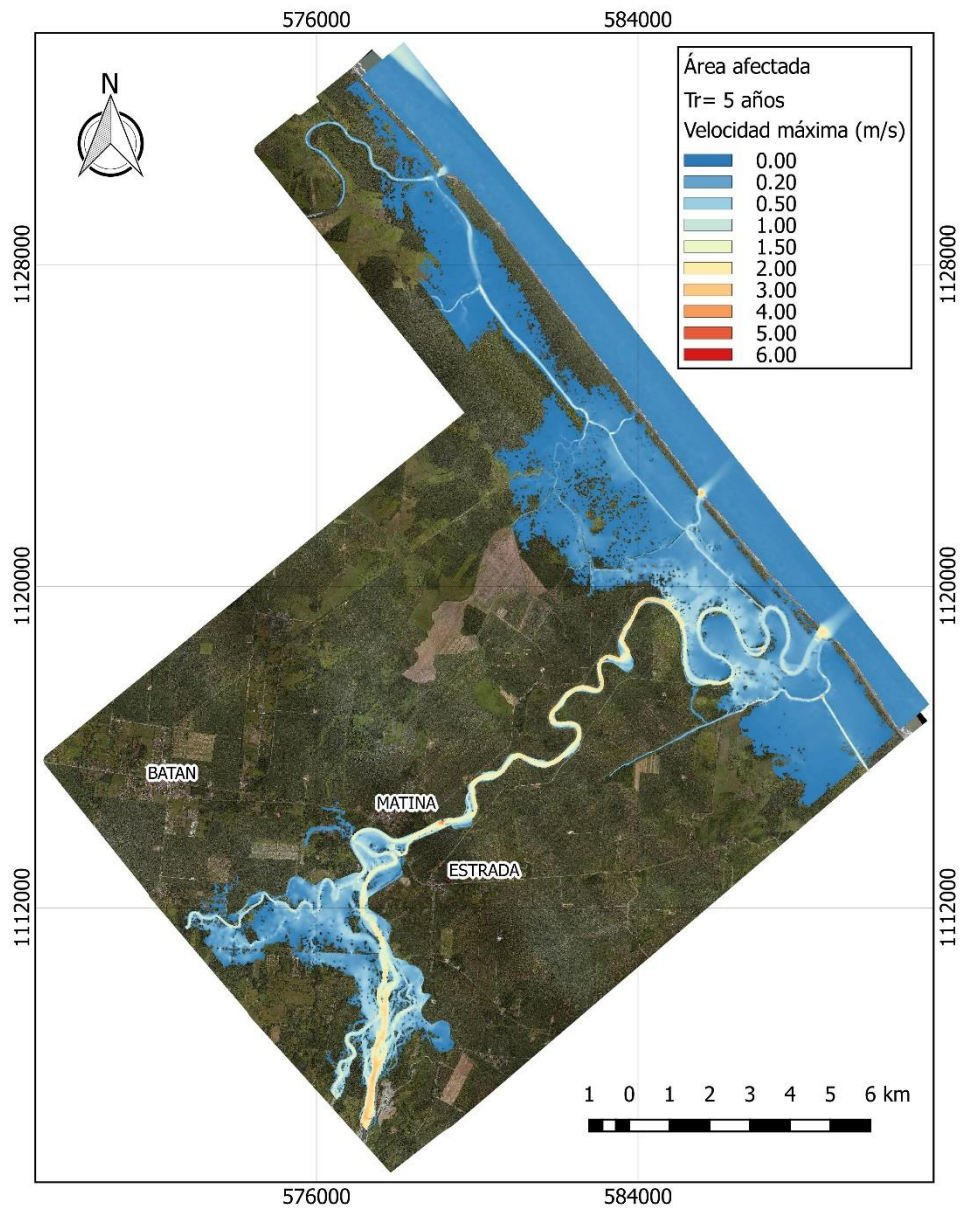


Figura 16. Escenario de velocidad de flujo para una avenida de $Tr=5$.

4.2.2 Periodo de retorno 10 años

En las Figuras 17 y 18 se observa el escenario de comportamiento del río Matina bajo una crecida con un periodo de retorno de 10 años. En la Figura 17 se indica la mancha de humedecimiento según la profundidad del agua sobre la superficie del suelo y en la Figura 18, se muestra la velocidad del flujo en el cauce. Para este escenario, se observa un crecimiento en la afectación de la margen izquierda del río Matina y una mayor velocidad de flujo en el cauce.

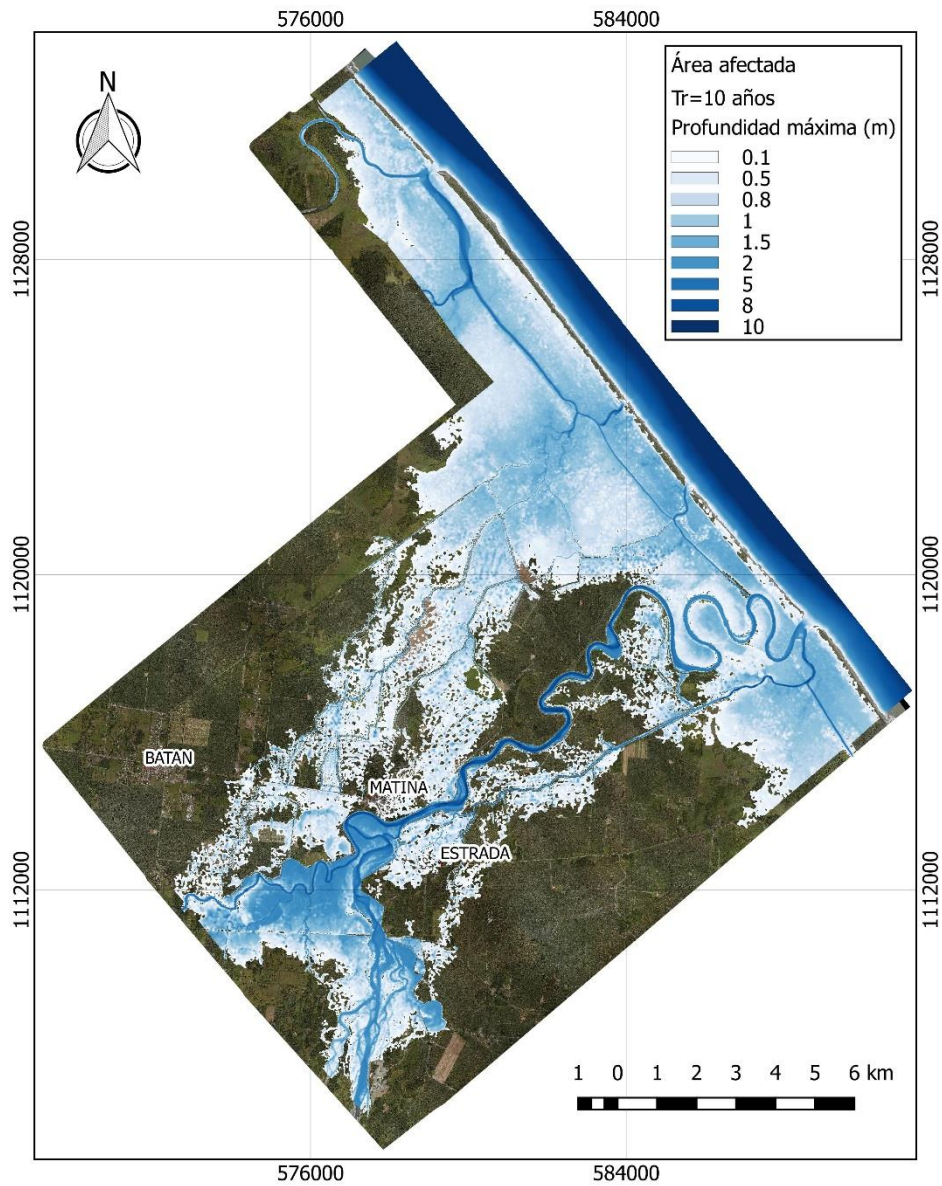


Figura 17. Escenario de profundidad de agua para una avenida de $Tr=10$.

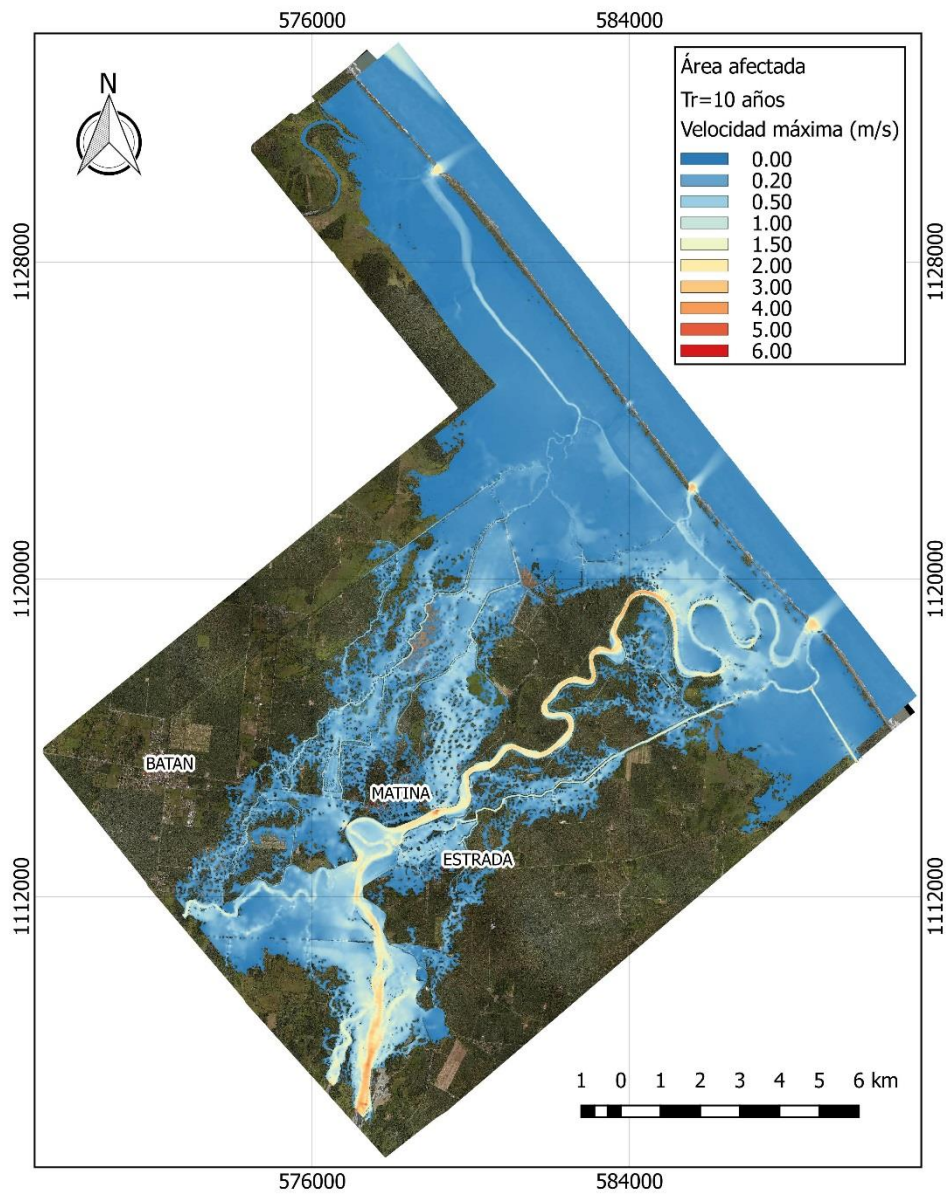


Figura 18. Escenario de velocidad de flujo para una avenida de Tr=10.

4.2.3 Periodo de retorno 25 años

En las Figuras 19 y 20 se observa el escenario de comportamiento del río Matina bajo una crecida con un periodo de retorno de 25 años. En la Figura 19 se indica la mancha de humedecimiento según la profundidad del agua sobre la superficie del suelo y en la Figura 20, se muestra la velocidad del flujo en el cauce. Para el Tr 25, las condiciones son similares

al Tr 10, donde existe aún un relativo control en la margen derecha debido a las estructuras de protección de las fincas productoras de banano.

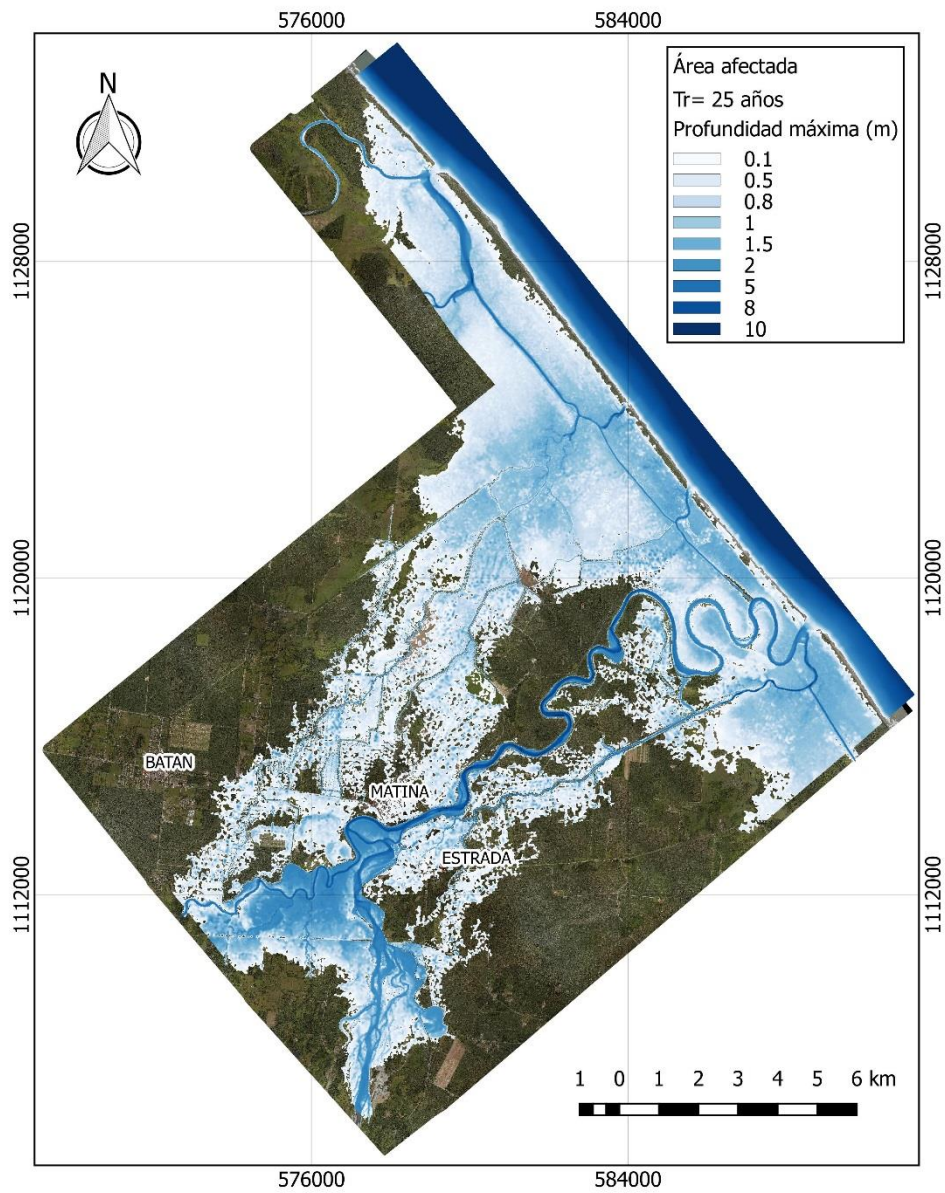


Figura 19. Escenario de profundidad de agua para una avenida de Tr=25.

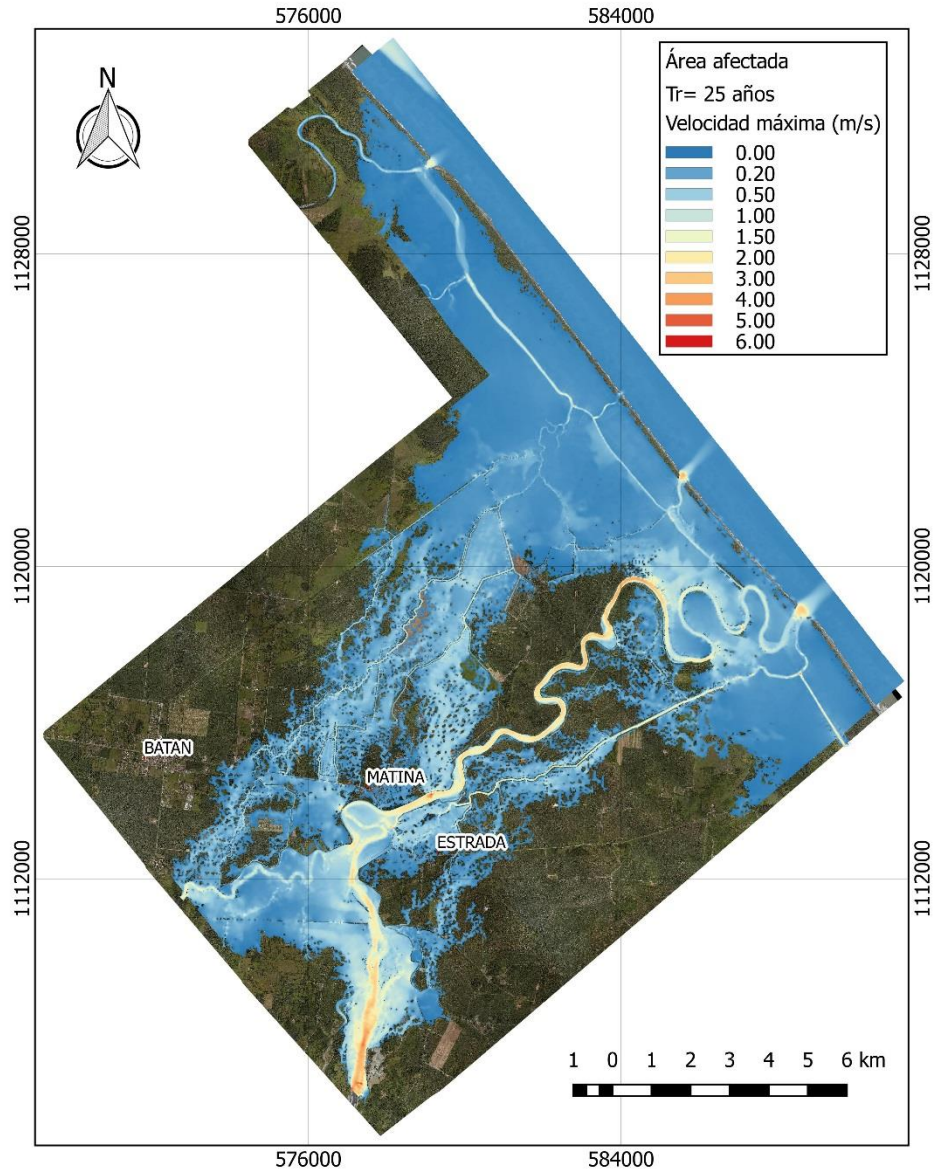


Figura 20. Escenario de velocidad de flujo para una avenida de $Tr=25$.

4.2.4 Periodo de retorno 50 años

En las Figuras 21 y 22 se observa el escenario de comportamiento del río Matina bajo una crecida con un periodo de retorno de 25 años. En la Figura 21 se indica la mancha de humedecimiento según la profundidad del agua sobre la superficie del suelo y en la Figura 22, se muestra la velocidad del flujo en el cauce. En este escenario, las condiciones de inundación son mucho más acentuadas en profundidad, área afectada y velocidad de flujo.

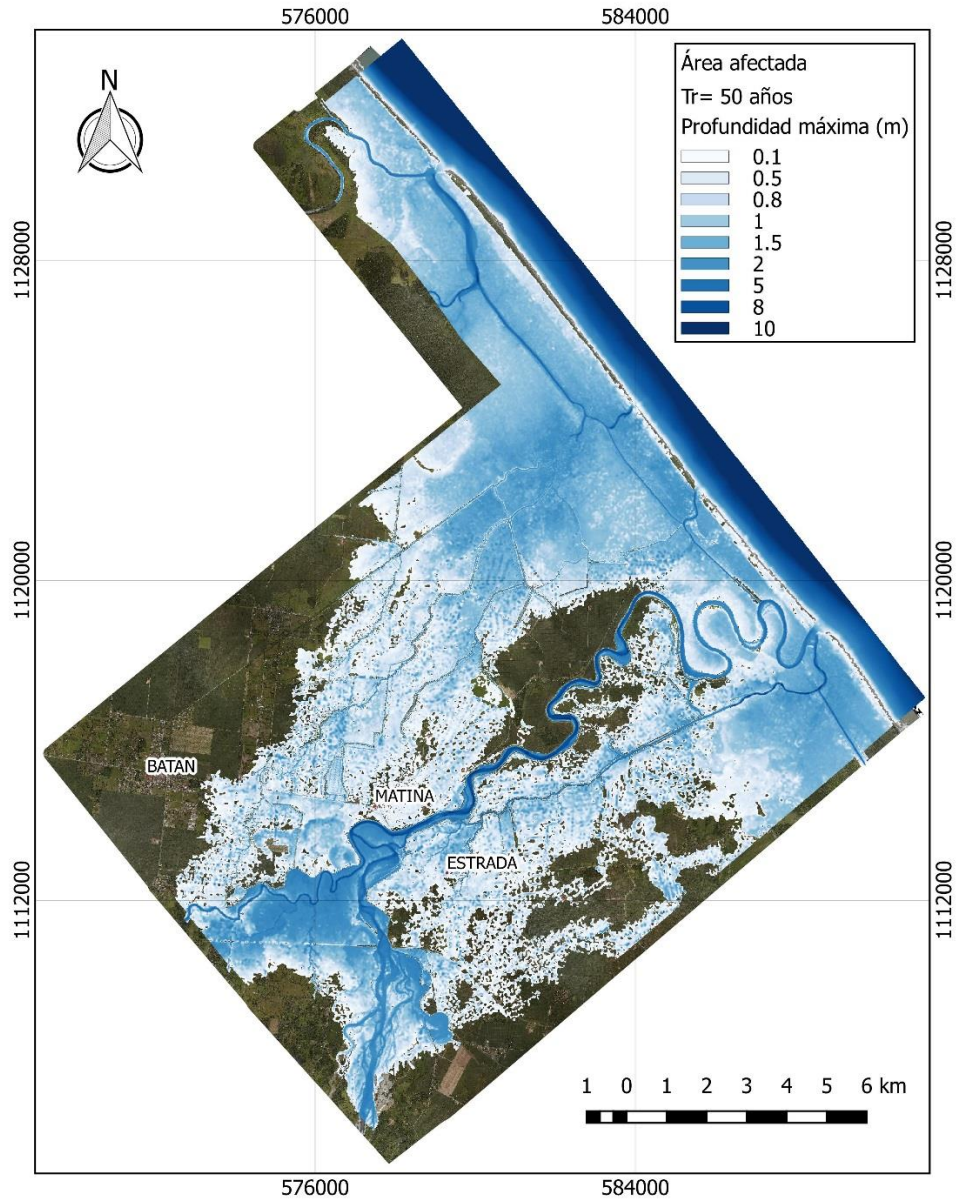


Figura 21. Escenario de profundidad de agua para una avenida de Tr=50.

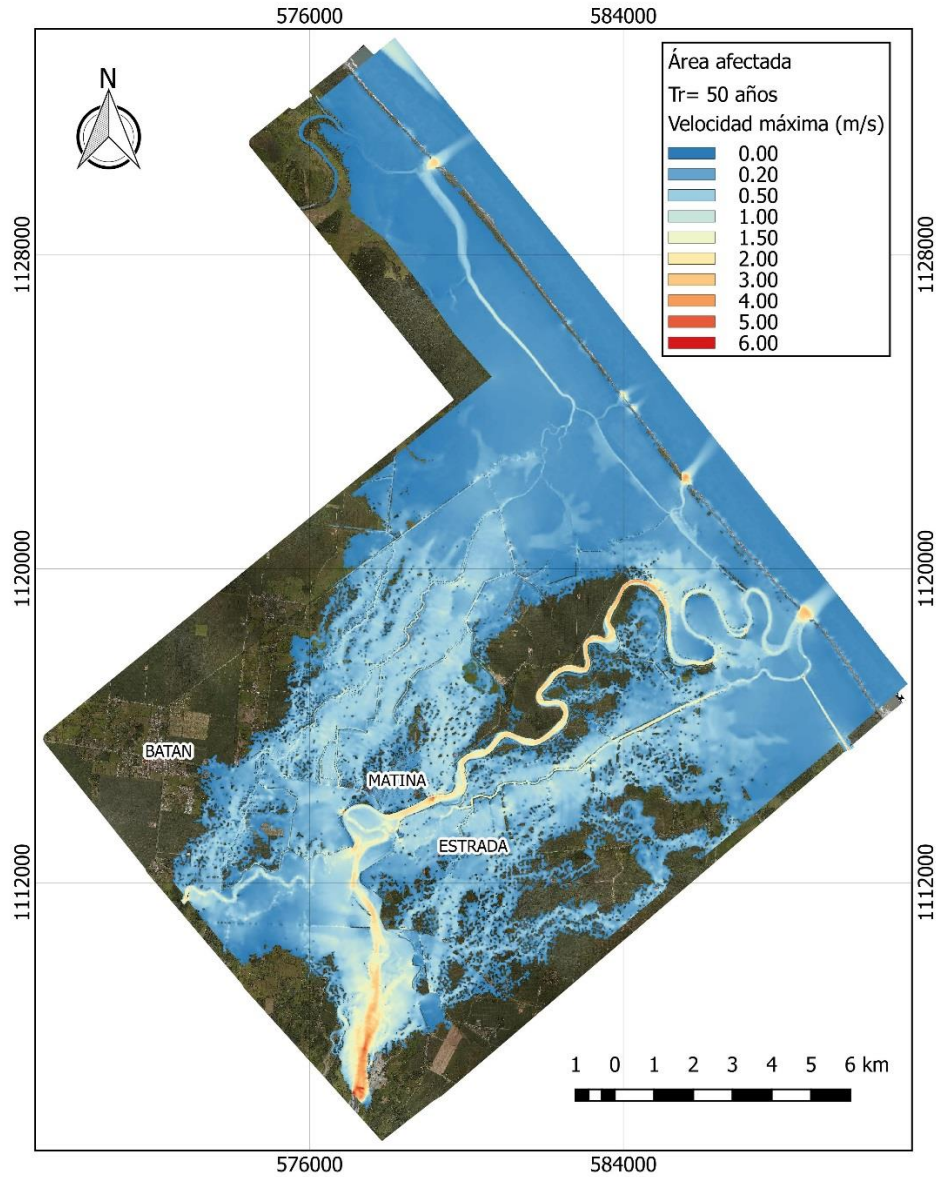


Figura 22. Escenario de velocidad de flujo para una avenida de Tr=50.

4.2.5 Periodo de retorno 75 años

En las Figuras 23 y 24 se observa el escenario de comportamiento del río Matina bajo una crecida con un periodo de retorno de 25 años. En la Figura 23 se indica la mancha de humedecimiento según la profundidad del agua sobre la superficie del suelo y en la Figura 24, se muestra la velocidad del flujo en el cauce. Para el Tr 75 son muy pocas las áreas a

ambos lados del cauce que se encuentran libres de inundación y se evidencia mejor la ruptura de salidas sobre la barra en la desembocadura.

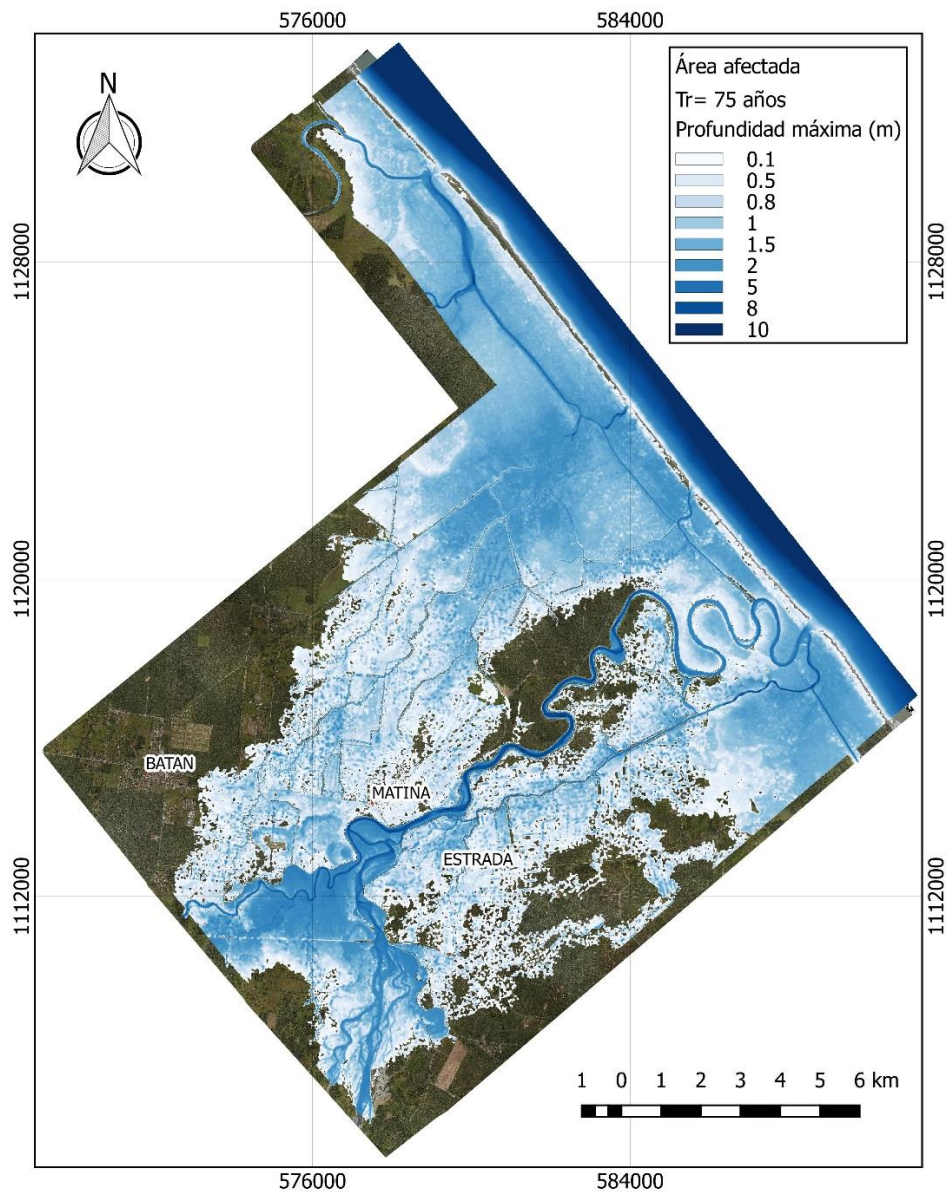


Figura 23. Escenario de profundidad de agua para una avenida de Tr=75.

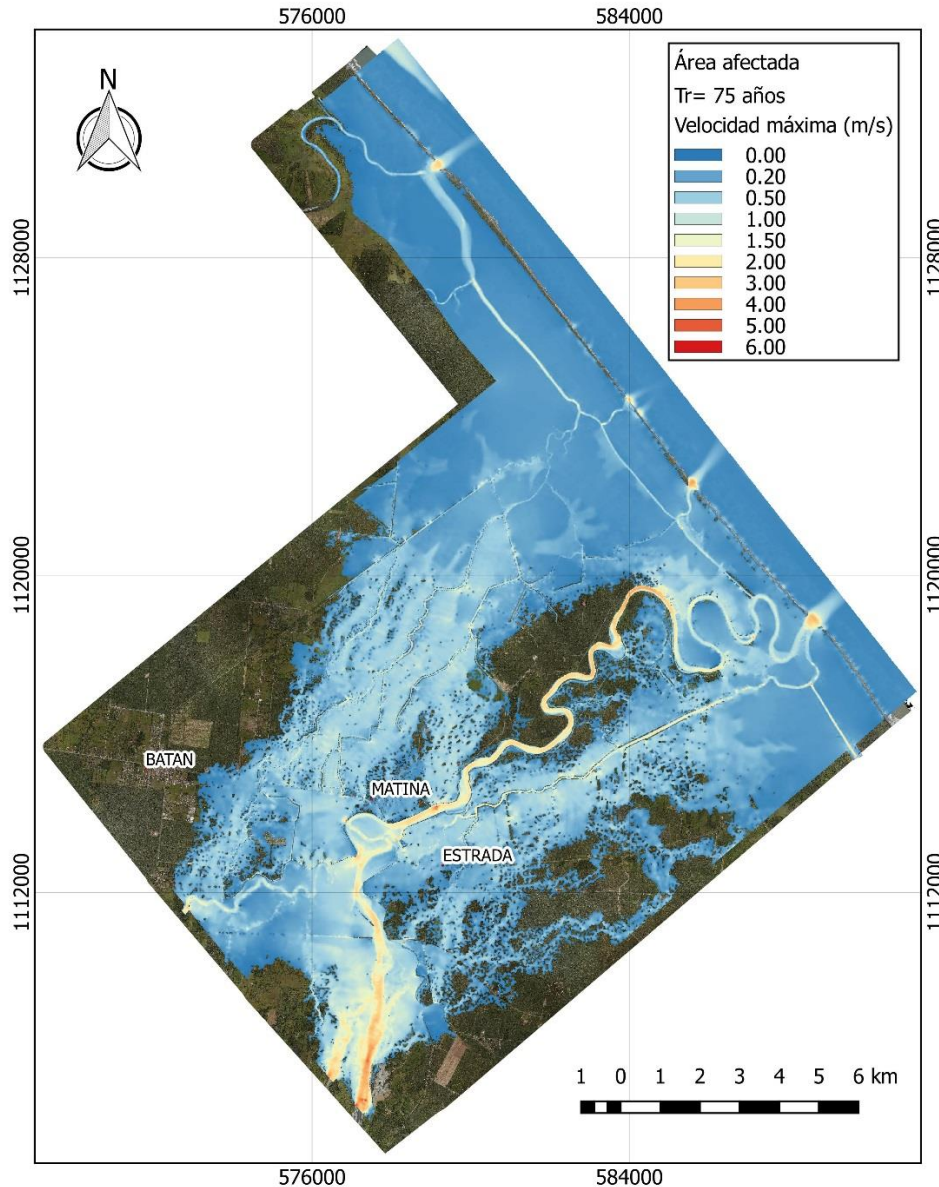


Figura 24. Escenario de velocidad de flujo para una avenida de $Tr=75$.

4.2.6 Periodo de retorno 100 años

En las Figuras 25 y 26 se observa el escenario de comportamiento del río Matina bajo una crecida con un periodo de retorno de 25 años. En la Figura 25 se indica la mancha de humedecimiento según la profundidad del agua sobre la superficie del suelo y en la Figura 26, se muestra la velocidad del flujo en el cauce. Bajo el escenario más crítico de este estudio, la planicie de inundación es cubierta casi en su totalidad.

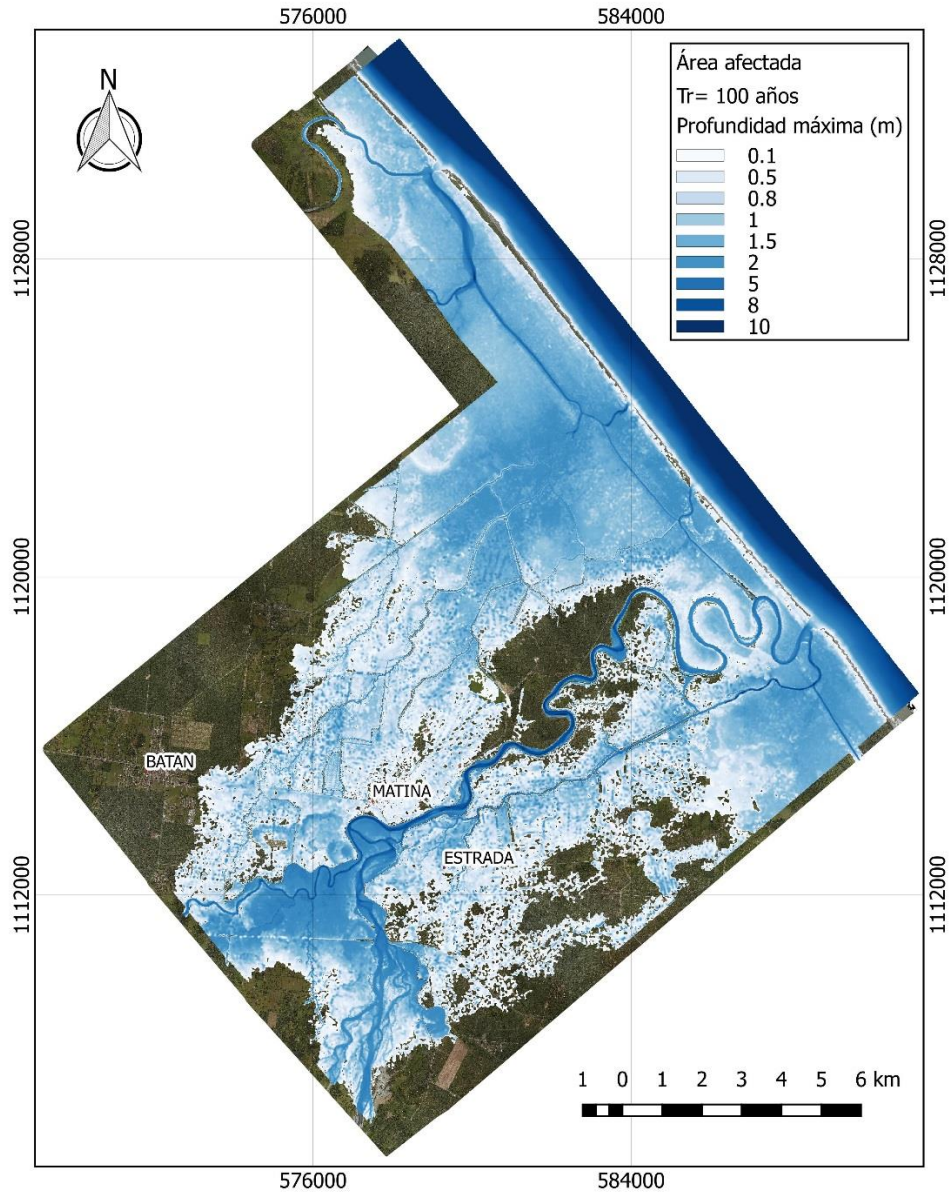


Figura 25. Escenario de profundidad de agua para una avenida de $Tr=100$.

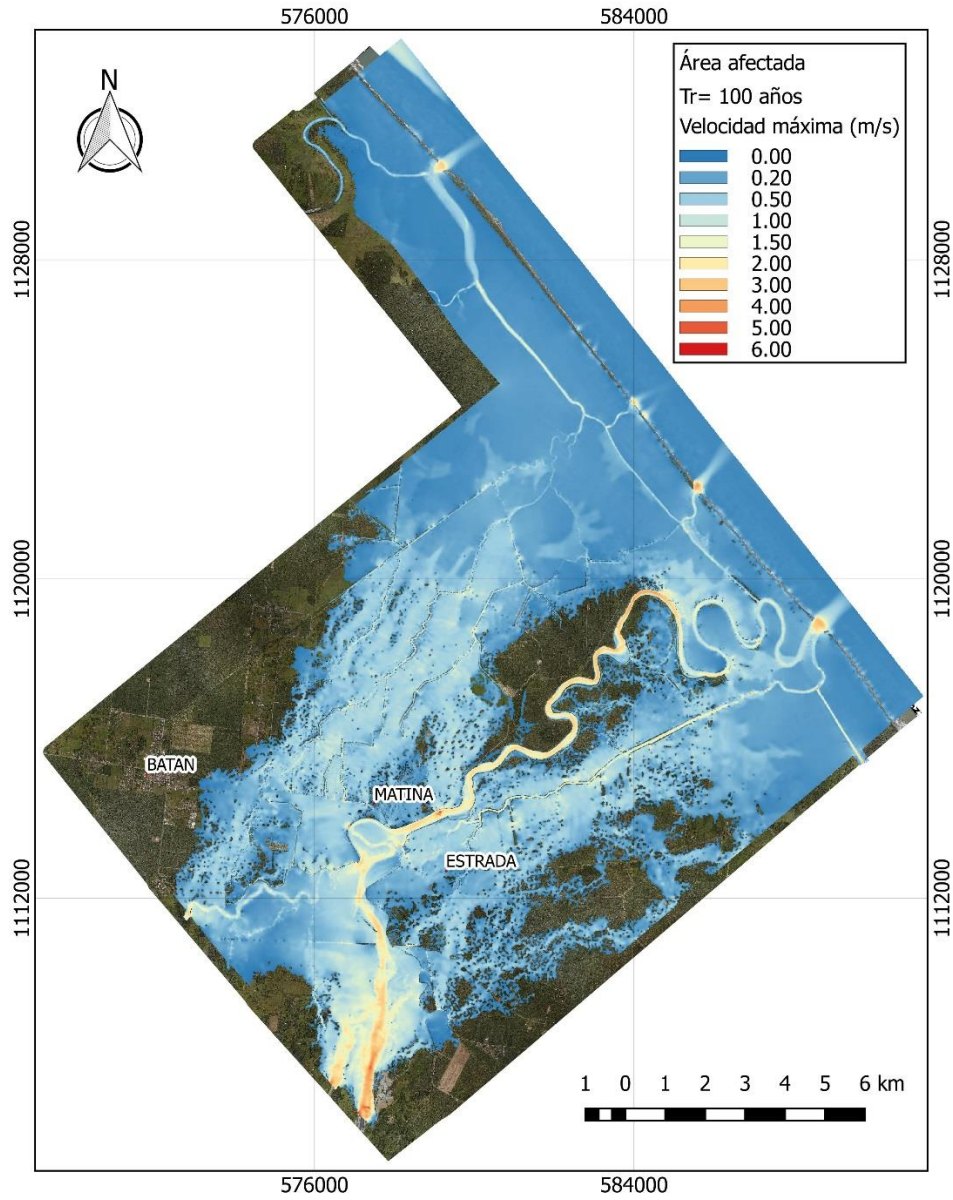


Figura 26. Escenario de velocidad de flujo para una avenida de $Tr=100$.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El análisis estadístico de los caudales observados durante los periodos de medición, logró capturar crecidas importantes para una modelación más apegada al registro de eventos analizado.
- Se identificaron los puntos de mayor riesgo de desbordamiento, con manifestaciones de riesgo desde los eventos que responden a bajos periodos de retorno.
- Se reconoce el efecto de las estructuras de diques según la magnitud de la crecida, es decir, hasta cierto escenario de periodo de retorno, cumplen su función de protección, pero no son una solución adecuada para eventos mayores, no obstante, el uso del suelo es determinante en el efecto de las crecidas, especialmente por la cercanía con el río de las actividades productivas y de la población.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, E. (2010). Análisis regional de crecidas máximas para Honduras. San Carlos, Guatemala.
- Ahmad, S y Simonovic, S. (2006). An intelligent decision support system for management of floods. *Water Resources Mangement* 20: 391-410.
- Bladé, E y Valentín, M. (2006). Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales: análisis integrado en una y dos dimensiones. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- Bladé, E; Cea, L; Coreseina, G; Escolanoc, E; Puertas, J; Vázquez-Cendón, E; Dolz, J; Coll, A. (2009). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. Recuperado: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131512000454>
- Castro, D; Hidalgo, B; Poveda, F. (2003). Sobre la Modelación Hidráulica en Obras de Saneamiento Básico. Departamento de Ciencias del Agua. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- Castro, M; Fernández, N; Ferreriro, A. (2008). Sediment transport models in Shallow Water equations and numerical approach by high order finite volume methods. *Computers & Fluids* 37: 299-316.
- Chanson, H. (2002). Hidráulica de flujo en canales abiertos. Queensland, Australia. Editorial McGraw-Hill
- Chow, V; Maidment, D; Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada. Universidad de Illinois, Urbana-Champaign, USA, McGraw-Hill, ISBN 958-600171-7.

Comisión Nacional de Emergencias. (2014). Amenazas Hidrometeorológicas del Cantón del Guarco. Recuperado de: <https://www.cne.go.cr/Atlas%20de%20Amenazas/ELGUARCO.htm>

Comisión Nacional de Emergencias. (2017). Histórico de desastres en Costa Rica, periodo Febrero 1723- Abril 2017. 2da ed. San José, Costa Rica. Recuperado de: https://www.cne.go.cr/Documentos/cedo/historico_desastres_cr.pdf

Crossley, A. (1999). Accurate and efficient numerical solutions for the Saint Venant equations of open channel flow. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. University of Nottingham. United Kingdom.

DAAD. (2006). Flood Manager E-learning. Recuperado de: <http://daad.wb.tu-harburg.de/homepage/>

DHI. (2004). Water and Environment. Mike 11-Sediment Transport. Recuperado de: <http://www.dhisoftware.com/Download/MIKEByDHI2011.aspx>

Desconocido. (2002). Matina sitiada por agua. La Nación, San José, CR, ene.11

Desconocido. (2004). Dos muertos, 1543 damnificados y 182 viviendas dañadas por lluvia . La Nación, San José, CR, may.11

Desconocido. (2005). Cinco desaparecidos y trece puentes colapsados en el Caribe. La Nación, San José, CR, ene.10

Desconocido. (2015). Alerta roja por inundaciones en el Caribe tras fuertes lluvias. La Nación, San José, CR, jun. 27

Díaz, C; Mamadou, K; Iturbe, A; Esteller, M; Reyna, F. (1999). Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del

curso alto del río Lerma, Estado de México. CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva, 6 (2)

Fallas, J. y Valverde, C. (2007) Inundaciones en Costa Rica y estudio de caso en una cuenca forestada del Caribe costarricense: Evidencia de los últimos 34 años. 25 p. Consultado: 13 abr 2015. Recuperado de: <http://www.cenat.ac.cr/CongresoGeoprocesamiento/contenidos/ponencias/Bosquinunda.pdf>

Fuentes, C; Parlange, J; Saucedo, H. (2001). Una Solución de Similitud de las Ecuaciones de Saint Venant. XI Congreso Nacional de Irrigación. Guanajuato, México.

García M. (2012). El modelado fluvial: Procesos de erosión, transporte y sedimentación fluvial. Formas resultantes. Riesgos de avenidas e inundación: medición, predicción y prevención. Los fenómenos de ladera. Riesgos asociados a estos fenómenos: medición, predicción y prevención. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/263925569_El_modelado_fluvial_Procesos_de_erosion_transporte_y_sedimentacion_fluvial_Formas_resultantes_Riesgos_de_avenidas_e_inundacion_medicion_prediccion_y_prevenccion_Los_fenomenos_de_ladera_Riesgos_asociado?enrichId=rgreq-cb91c8c5ff701bdf46c64e576a6c081a-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI2MzkyNTU2OTtBUzoXNzI0MjUzNTg2MTg2MjRAMTQxODEyMDgxNzIzNg%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf

Grant, A; Oreamuno, R; Serrano, A; Vargas, O. (2004). Comisión sobre la problemática de inundaciones en la Vertiente Atlántica. Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. 44p.

Gumbel, E. (1941). The return period of flood flows. The annals of mathematical statistics. 12(2):163-190.

- Inder. (2016). Caracterización del Territorio Limón-Matina. Recuperado de https://www.inder.go.cr/territorios_inder/region_huetar_caribe/caracterizaciones/Caracterizacion-territorio-Limon-Matina.pdf
- Jiménez, R. (2011). Políticas de cambio climático en Costa Rica, integrando esfuerzos para asumir los retos. Recuperado de <https://investiga.uned.ac.cr/cicde/images/polcam.pdf>
- Jiménez, E y Montero, R. (2018). Ruta 32 tendrá cierres preventivos por mal tiempo. La Nación. San José, Costa Rica, ene.15
- Joo, J; Kjeldsen, T; Kim, H; Lee, H. (2013). A comparison of two event-based flood models (ReFH-rainfall runoff model and HEC-HMS) at two Korean catchments, Bukil and Jeungpyeong. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(1), 330–343. doi:10.1007/s12205-013-0348-3
- Jovanovic, M; Pasche, E; Toepfel, M; Donner, M. (2006). 1-D Hydraulic. Consultado 20 abril 2013. Recuperado de: http://daad.wb.tu-harburg.de/fileadmin/BackUsersResources/Hydrology/1D_Theory_Resistance/exercises/Script_1D_hydraulic.pdf
- Loaiza, V. (2008). Alerta amarilla por mal tiempo en Limón . La Nación. San José, CR, nov.19
- Matarrita, M y Ordoñez, M. (2018). 65 personas atrapadas por terrible inundación en Matina. La Prensa Libre. San José, CR, ene.16
- Morris, G y Fan, J. (2009). Design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use. Vol. 1.01. New York, U.S.A. Recuperado de: https://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/classes/CE716/ResSedHandbook1_01.pdf

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). (2013). Recuperado de:
http://www.nauticalcharts.noaa.gov/csdl/learn_models.html

Ortiz, E y Roser, B. (2006). Major and trace element provenance signatures in stream sediments from the Kando River, San'in district, southwest Japan. *Island Arc*, 15(2): 223-238.

Roux, H. (2004). Estimation de paramètres en hydraulique fluviale, à partir de données caractéristiques de l'imagerie aérienne. Recuperado de <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000040/01/roux.pdf>

Salas, M y Jiménez, E. (2014). Centro Nacional de Prevención de Desastres: Inundaciones. Serie Fascículos. Recuperado de <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/3FASCCULOINUNDACIONES.PDF>

Seibert, J y Beven, K. (2009). Gauging the ungauged basin : how many discharge measurements are needed ? *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 883–892.

Segura, L y Casasola, R. (2011). Modelación hidráulica aplicando Hec-Georas como una herramienta en la gestión del riesgo de inundaciones: caso río La Estrella, Limpon, Costa Rica. XI Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina Perú, del 7-9 de noviembre.

Shepard, F. (1954). Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of sedimentary Petrology*, 24. (151-154)

US Army Corps of Engineers. (2013). Hydrologic Modeling System User's Manual. Version 4.0. Davis California, United States of America.

Vallejos, S; Esquivel, L; Hidalgo, M. (2012). Histórico de desastres en Costa Rica. San José, Costa Rica.

Villón, M. (2006) Hidrología Estadística. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 440 p.

Weibull, W. 1939. A statistical theory of the strength of materials. Ingeniors Vetenskaps Akademien (The Royal Swedish Institute for Engineering Research). Proc. 51:5-45.