



MODELADO HIDRODINÁMICO PARA GENERAR MAPAS DE ZONAS PROPENSAS A INUNDACIÓN EN LA CUENCA BINACIONAL DEL RÍO SIXAOLA

Proyecto N°340-C4-401, Universidad de Costa Rica

Preparado para: Organización de Estudios Tropicales

Elaborado por:

Alejandra M. Rojas González, Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Escuela de Ingeniería de Biosistemas
Universidad de Costa Rica

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1-6
1.1	Propósito del estudio	1-6
1.2	Alcance del trabajo	1-6
2	Descripción del área de estudio.....	2-7
2.1	Antecedentes en la zona y datos históricos	2-7
2.2	Localización.....	2-8
2.3	Climatología	2-10
2.3.1	Precipitación	2-10
2.3.2	Temperatura.....	2-12
2.3.3	Humedad.....	2-13
2.3.4	Evapotranspiración	2-14
2.3.5	Riesgo a inundaciones	2-14
2.4	Características morfométricas de las subcuencas y red de drenaje	2-17
2.4.1	Delimitación del área de estudio	2-17
2.4.2	Red Hidrográfica	2-18
2.4.3	Parámetros de forma de las subcuencas	2-19
2.4.4	Parámetros de relieve de las subcuencas	2-21
2.5	Cobertura	2-24
2.6	Edafología de suelos.....	2-27
3	Análisis hidrológico	3-31
3.1	Metodología del análisis hidrológico	3-31
3.1.1	Análisis de lluvia para obtención de caudales	3-32
3.1.2	Escorrentía directa en HEC-MS	3-41
3.1.3	Transformación precipitación-escorrentía a hidrograma.....	3-44
3.1.4	Flujo base.....	3-46
3.1.5	Tránsito de avenidas o rastreo hidráulico:.....	3-47
3.2	Simulación Hidrológica.....	3-50
3.2.1	Resultados del análisis hidrológico	3-52
4	Análisis Hidráulico.....	4-56

4.1	Geometría del terreno	4-57
4.2	Rugosidad del terreno	4-59
4.3	Condiciones de frontera.....	4-61
4.4	Resultados de Simulación Hidráulica.....	4-65
5	Conclusiones	5-81
6	Equipo de Trabajo	6-82
7	Referencias	7-83
8	Anexos.....	8-85
8.1	Anexo: Informe de Gira.....	8-86
8.2	Anexo 2: Parámetros para tiempos de concentración y de retardo.....	8-98
8.3	Anexo: Láminas máximas de precipitación para diferentes duraciones y periodos de retorno	8-103

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Distribución del área de la cuenca, en los cantones y distritos dentro del territorio costarricense.</i>	<i>2-9</i>
<i>Tabla 2. Estaciones meteorológicas del IMN</i>	<i>2-10</i>
Tabla 3. Clasificación de las cuencas de acuerdo con la pendiente promedio de laderas.....	2-19
<i>Tabla 4. Parámetros de forma de las subcuencas.....</i>	<i>2-20</i>
<i>Tabla 5. Características topográficas de las subcuencas.</i>	<i>2-21</i>
<i>Tabla 6. Porcentaje y área por subcuenca según tipo de cobertura presente.</i>	<i>2-25</i>
<i>Tabla 7. Variables de interés para cada calicata.</i>	<i>2-29</i>
<i>Tabla 8. Láminas máximas de lluvia para diferentes duraciones y periodos de retorno (Rojas, 2011).</i>	<i>3-33</i>
<i>Tabla 9. Ubicación y asignación de datos de precipitación satelital para las subcuencas según sus centroides o estaciones de referencia.</i>	<i>3-35</i>
<i>Tabla 10. Eventos importantes transcurridos en el periodo de estudio (2001 – 2023).</i>	<i>3-37</i>
<i>Tabla 11. Láminas de precipitación para diferentes periodos de retorno y duraciones, para la subcuenca Sixaola 3.</i>	<i>3-38</i>
<i>Tabla 12. Láminas de precipitación para diferentes periodos de retorno y duraciones, para la subcuenca Telire 1.</i>	<i>3-38</i>
<i>Tabla 13. Números de curva de escorrentía (CN II) de acuerdo con el tipo de uso de suelo.....</i>	<i>3-42</i>
<i>Tabla 14. Número de curva, área y porcentaje de grupo hidrológico por cuenca.</i>	<i>3-42</i>
<i>Tabla 15. Número de curva y área por Subcuenca.</i>	<i>3-43</i>
<i>Tabla 16. Tiempos de concentración y retardo para cada subcuenca</i>	<i>3-46</i>
<i>Tabla 17. Tránsitos de avenida.</i>	<i>3-48</i>
<i>Tabla 18. Caudales instantáneos históricos.....</i>	<i>3-52</i>

Tabla 19. Caudales máximos para diferentes periodos de retorno con los límites de confianza según análisis probabilístico.....	3-53
Tabla 20. Rugosidad de Manning para la zona de estudio.....	4-60
Tabla 21. Condiciones de frontera para modelo hidráulico.....	4-62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la cuenca del Río Sixaola con las líneas de drenaje.....	2-9
Figura 2. Precipitación promedio mensual de estaciones del IMN.....	2-11
Figura 3. Precipitación mensual promedio. Fuente: IMN, 2018. SNIT, 2020. WorlClim, 2000.....	2-11
Figura 4. Temperatura promedio mensual para las estaciones indicadas. Fuente: IMN, 2018. WorldClim, 2000.	2-12
Figura 5. Temperatura máxima promedio mensual para las estaciones indicadas. Fuente: IMN, 2018. WorldClim, 2000.....	2-12
Figura 6. Temperatura mínima promedio mensual para las estaciones indicadas. Fuente: IMN, 2018. WorldClim, 2000.....	2-13
Figura 7. Humedad relativa mensual para las estaciones meteorológicas. Fuente: IMN, 1971-1996.	2-13
Figura 8. Evapotranspiración potencial mensual promedio para el área de estudio. Fuente: SNIT, 2020.	2-14
Figura 9. Mapa de Riesgo de deslizamiento en la cuenca del Río Sixaola, 2011. Fuente: Rojas, 2011. ...	2-15
Figura 10. Mapa de Amenazas en Sixaola, 2012. Fuente: Campos Zumbado, 2012.	2-15
Figura 11. Zonificación de amenaza por inundaciones en el Valle del Río Sixaola. Fuente: Barrantes y Vargas, 2011.....	2-16
Figura 12. Metodología aplicada para el procesamiento de delimitación de cuencas mediante ArcGIS Pro.	2-17
Figura 13. Subcuencas del Río Sixaola.	2-18
Figura 14. Elevaciones de las subcuencas.	2-22
Figura 15. Mapa de pendientes en la zona de estudio.....	2-23
Figura 16. Curva hipsométrica de la cuenca del río Sixaola.	2-23
Figura 17. Uso de suelo por cuenca.....	2-26
Figura 18. Mapa de uso del suelo en la zona de estudio.....	2-27
Figura 19. Composición promedio de las fracciones del suelo que conforman la Cuenca del Río Sixaola.	2-28
Figura 20. Mapa de la clasificación de suelos y los puntos del CIA.....	2-30
Figura 21. Distribución de los grupos hidrológicos en la cuenca del Río Sixaola.	2-30
Figura 22. Ubicación de los centroides por subcuenca.	3-35
Figura 23. Factor de ajuste aplicado por año a los datos satelitales de precipitación PERSIANN-DIR Now.....	3-36
Figura 24. Curvas de lámina de precipitación, duración y frecuencia para la subcuenca Sixaola 3 del Río Sixaola de datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.....	3-38
Figura 25. Curvas de lámina de precipitación, duración y frecuencia para la subcuenca Telire 1 del Río Sixaola de datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.....	3-39
Figura 26. Factores de reducción de área según duraciones de la lluvia.....	3-40

Figura 27. Mapa de los CN ponderados para la cuenca del Río Sixaola.....	3-44
Figura 28. Tránsito de avenidas por subcuenca.....	3-49
Figura 29. Esquema del modelo en HEC-HMS.....	3-51
Figura 30. Análisis de probabilidad de los caudales históricos.	3-54
Figura 31. Caudales máximos simulados para diferentes periodos de retorno en las subcuencas que conforman la cuenca del Río Sixaola.	3-55
Figura 32. Caudales máximos simulados para diferentes periodos de retorno en las uniones de las subcuencas que conforman la cuenca del Río Sixaola.	3-55
Figura 33. Distribución de excedencias y caudales en subcuenca Telire 1 y unión Telire-Coen para 50 años de periodo de retorno.....	3-56
Figura 34. Caudales simulados en la Unión Inter-Yorkin y el tránsito TA-Sixaola3.....	3-56
Figura 35. Área de trabajo de la modelación hidráulica.	4-58
Figura 36. Detalle de la combinación del MED y la batimetría del río en HEC-RAS Mapper.	4-59
Figura 37. Cobertura en zona de análisis hidráulico.....	4-60
Figura 38. Entradas del modelo para un periodo de retorno de 50 años.....	4-63
Figura 39. Localización de las entradas y salidas del modelo hidráulico y mallados generados.	4-64
Figura 40. Profundidad máxima de inundación para un periodo de retorno de 100 años.	4-66
Figura 41. Velocidades máximas en planicie de inundación aguas arriba de Sureka (Bratsi) y aguas abajo.	4-67
Figura 42. Velocidades de inundación en diferentes tiempos sobre Sixaola.....	4-68
Figura 43. Velocidad máxima de inundación en planicie para un periodo de retorno de 2 años.....	4-69
Figura 44. Elevación mancha de inundación máxima para un periodo de retorno de 2 años.....	4-70
Figura 45. Velocidad máxima de inundación en planicie para un periodo de retorno de 5 años.....	4-71
Figura 46. Elevación mancha de inundación máxima para un periodo de retorno de 5 años.....	4-72
Figura 47. Velocidad máxima de inundación en planicie para un periodo de retorno de 10 años.....	4-73
Figura 48. Elevación mancha de inundación máxima para un periodo de retorno de 10 años.....	4-74
Figura 49. Velocidad máxima de inundación en planicie para un periodo de retorno de 25 años.....	4-75
Figura 50. Elevación mancha de inundación máxima para un periodo de retorno de 25 años.....	4-76
Figura 51. Velocidad máxima de inundación en planicie para un periodo de retorno de 50 años.....	4-77
Figura 52. Elevación mancha de inundación máxima para un periodo de retorno de 50 años.....	4-78
Figura 53. Velocidad máxima de inundación en planicie para un periodo de retorno de 100 años.....	4-79
Figura 54. Elevación mancha de inundación máxima para un periodo de retorno de 100 años.....	4-80

1 Introducción

1.1 Propósito del estudio

El propósito de este estudio es evaluar las condiciones hidrológicas de la cuenca del Río Sixaola para posteriormente desarrollar mapas de inundación de diferentes periodos de retorno. El Río Sixaola está ubicado en la provincia de Limón, Costa Rica al sur este del país. El análisis generado será utilizado para evaluar los niveles de inundabilidad y velocidades del Río Sixaola mejorando el entendimiento del comportamiento de la hidrodinámica de las inundaciones, así como de las zonas susceptibles. Los resultados hidrológicos serán un insumo importante para la gestión del riesgo, los sistemas de alerta temprana y los planes de ordenamiento territorial. El modelo hidrológico aplicado es HEC-HMS y el modelo hidráulico bidimensional es HEC-RAS 2D.

1.2 Alcance del trabajo

Este segundo informe tiene como objetivo evaluar la escorrentía superficial del río Sixaola para determinar los caudales picos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Para esto se realiza una división de la cuenca en subcuencas según los puntos de interés para la futura modelación hidráulica utilizando la herramienta de ArcGis Pro. Se caracterizan las subcuencas del río Sixaola desde el punto de vista climatológico, y geomorfológico. Se determinan los parámetros de entrada al modelo como la cobertura, suelos, número de curva, parámetros de infiltración, tiempo de concentración y parámetros de los tránsitos de avenidas. Se analiza el histórico de lluvias de la zona para eventos de precipitación máximos y se generan curvas IDF (intensidad-duración- frecuencia) para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años utilizando los datos de precipitación de PERSIAN y los de las estaciones meteorológicas.

Se realiza una modelación hidrológica de las subcuencas mediante el uso del software HEC-HMS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos. Esta herramienta es utilizada para realizar simulaciones hidrológicas de cuencas fluviales y sistemas de drenaje. Su función principal es crear la simulación del ciclo hidrológico de la cuenca permitiendo de esta forma evaluar el comportamiento del agua ante factores climáticos y cambios en el uso de suelo.

Se trabaja una aproximación de la simulación hidráulica con el fin de encontrar puntos de mejora como refinamiento de la malla en sitios necesarios, localización de infraestructura importante, y estabilidad numérica de la simulación. Los resultados presentados en esta sección son preliminares y se estará trabajando en el refinamiento del modelo para generar la mejor información posible.

2 Descripción del área de estudio

2.1 Antecedentes en la zona y datos históricos

La región de Sixaola es una de las zonas con mayor incidencia de inundaciones de Costa Rica. Se tienen reportes registrados de este fenómeno en los años de 1928, 1935, 1945, 1970 y 1975 (Barrantes, 1995) así como en 1988, 1991, 1993, 2002, 2005 y 2008, siendo los más extremos los experimentados en 1935, 1970, 2002, 2005 y 2008 (Barrantes & Vargas, 2011).

Estos acontecimientos tienen una profunda afectación en las comunidades aledañas al río, generando pérdidas enormes en agricultura y ganadería, destrucción de viviendas y la muerte de fauna silvestre (CNE, 1995). Los pobladores de esta zona tienden a construir sus hogares en sitios de alto riesgo de inundación, por la alta fertilidad de los suelos. Esta inclinación es producto del uso histórico de la región para actividades de subsistencia y agroexportación (Barrantes & Vargas, 2011).

Sumado a lo anterior, los habitantes de la zona poseen un alto nivel de vulnerabilidad económica y social. Los núcleos de la comunidad están conformados, en su mayoría, por población mestiza, indígena y afrocaribeña, existiendo, además, un fuerte componente migratorio proveniente de Panamá y de Nicaragua (ERDS, 2006). Estas colectividades cuentan con una economía frágil basada en el trabajo en las bananeras y en la agricultura de subsistencia, además de disponer de un bajo nivel educativo y un crecimiento exponencial en de la población.

Las causas de estas inundaciones son variadas, y en las más antiguas no se tiene una sistematización de los datos hidrometeorológicos salvo por reportes pluviales cortos por parte de las bananeras. Las consecuencias de estas primeras inundaciones en los años 1928 y 1935 tienen como principal protagonista la destrucción de las plantaciones bananeras en el Valle de Talamanca producto del destroz de las vías férreas y de los puentes construidos por la United Fruit (Borge & Villalobos, 1988).

Las inundaciones de los años setenta fueron causadas por condiciones de temporal extremo, generando altas magnitudes de lluvia (CNE, 1995). Por su parte, el evento ocurrido el 29 de enero de 1988 registró caudales máximos de 3400 m³/s en la estación de Sixaola a los 3480 m³/s en la estación de Bratsi. Estos fueron generados por un frente frío impulsado por un sistema de alta presión sobre México. Además, el fenómeno del 13 de agosto de 1991 tuvo como causante fuertes precipitaciones registradas y como agravante el levantamiento de la plataforma continental del terremoto de magnitud 7,5 en la provincia de Limón, alcanzando en ese momento una inundación con caudales máximos de 3520 m³/s en Bratsi y 4090 m³/s en Sixaola (CNE, 1995). Además, se tiene registrado un evento el 15 de diciembre de 1975 donde se obtuvo 2860 m³/s en Bratsi y 3610 m³/s en Sixaola.

Estas narraciones ejemplifican la vulnerabilidad de la zona y la gama de factores que influyen sobre la sensibilidad de esta. Actualmente, a estas posibles causas hay que sumarle el efecto que posee el cambio climático sobre el aumento del nivel del mar. Esta variable ha experimentado una tendencia creciente en el periodo 1992 a 2012 en el Caribe Centroamericano, registrando los aumentos más abruptos en las costas Atlánticas de Costa Rica y Panamá, alcanzado valores de 5,0 mm/año (BIOMARCC-USAID, 2013).

Lo anterior hace necesaria la intervención de estudios que permitan estimar el nivel de afectación por inundaciones que tendrá esta zona en años futuros. Mediante modelos de predicción se pueden diseñar estrategias que faciliten la construcción de obras de protección para el resguardo de la población y de las plantaciones (Huguenin & Vega, 2016). Con el uso de estos datos, se abre la puerta a una planificación territorial adecuada con planes de uso de suelo para producción y la construcción de viviendas, que mitigue las inundaciones y beneficie la sostenibilidad de las comunidades de la zona.

2.2 Localización

La zona de estudio se ubica en la Vertiente Caribe de Costa Rica, el Río Sixaola sirve como frontera entre Costa Rica y Panamá, esto lo convierte en un cauce Binacional, el cual es alimentado del lado costarricense por los Ríos Telire, Coen, Lari y Uren, del lado de Panamá por el Río Yorkin (Figura 1).

La cuenca del Río Sixaola se extiende en Costa Rica por los cantones de Talamanca, Limón, Buenos Aires, Pérez Zeledón, con áreas de 2306.6 km², 3.06 km², 0.83 km² y 0.19 km² respectivamente, y posee un área dentro del territorio panameño de 748,5 km². Según el INEC para el censo 2011 la población en estos cantones presenta para Talamanca 30 713 habitantes, Limón con 94 420 habitantes, Buenos Aires con 45 244 habitantes, Pérez Zeledón con 135 429 habitantes, la distribución de área de la cuenca en los cantones y distritos se presenta en la Tabla 1.

La zona de estudio presenta una topografía variable, tiene inicio en el Cerro Chirripó en la cordillera de Talamanca, hasta las zonas bajas de la cuenca en la desembocadura del Río Sixaola, poblados dentro del distrito de Sixaola son constantemente afectados por inundaciones, uno de los últimos eventos con mayor impacto ocurrió en el año entre el 22 al 25 de julio de 2021, donde se presentó el desbordamiento del Río Sixaola afectado comunidades como Daytonia, Celia, Paraíso, y Catarina, las cuales, son principalmente poblados dedicados a la producción del cultivo de banano.

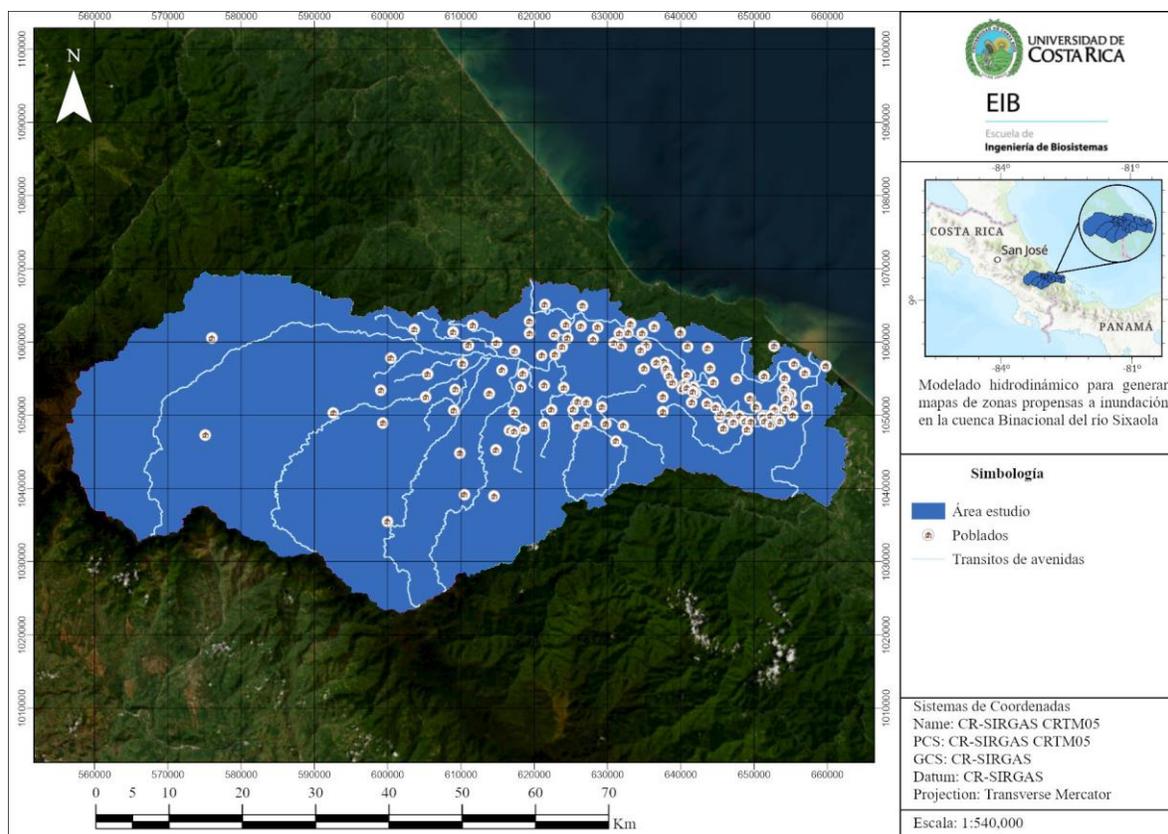


Figura 1. Localización de la cuenca del Río Sixaola con las líneas de drenaje.

Tabla 1. Distribución del área de la cuenca, en los cantones y distritos dentro del territorio costarricense.

Cantón	Distrito	Área (km ²)
Talamanca	Telire	1974.52
Talamanca	Bratsi	177.47
Talamanca	Sixaola	132.58
Talamanca	Cahuita	22.08
Limón	Valle de la Estrella	3.06
Buenos Aires	Buenos Aires	0.55
Buenos Aires	Potrero Grande	0.10
Buenos Aires	Volcán	0.09
Buenos Aires	Brunka	0.09
Pérez Zeledón	San Pedro	0.15
Pérez Zeledón	Rivas	0.04

2.3 Climatología

Debido a que el estudio abarca tanto territorio nacional como internacional, la caracterización climatológica debe realizarse con datos de estaciones meteorológicas de Costa Rica y Panamá. En este caso se utilizan para el análisis climatológico cuatro estaciones meteorológicas del IMN (Tabla 2) como la localizada en el Aeropuerto Internacional de Limón, Sixaola, Manzanillo e Hitoy Cerere. Además, se incorporan datos generales del SNIT correspondientes a la zona solo para Costa Rica y datos promedio para la cuenca del WorldClim para considerar valores registrados en Panamá. Adicionalmente, el IMN cuenta con 3 estaciones adicionales en el cantón de Talamanca: Puerto Vargas, Sepecue en Telire y Gavilán Canta en Bratsí.

Para la climatología se analizan cuatro variables: temperatura, humedad relativa, precipitación y evapotranspiración. Para cada variable se evaluaron por sus valores máximos, mínimos y promedio a lo largo de diferentes periodos.

Tabla 2. Estaciones meteorológicas del IMN

Estaciones	Cantón	Periodo	Parámetros
Aeropuerto Internacional Limón	Central Limón	1998-2018	Precipitación, temperatura, humedad relativa.
Sixaola	Sixaola	1997-2018	
Manzanillo	Talamanca	2006-2018	
Hitoy Cerere	Matama	1998-2018	
Puerto Vargas, MINAE	Talamanca		Precipitación, radiación, velocidad viento temperatura, humedad relativa, días de lluvia, radiación, velocidad viento.
Sepecue, Telire	Talamanca		
Gavilán Canta, Bratsi	Talamanca		

2.3.1 Precipitación

Para la caracterización mensual de la precipitación se utilizó información promedio de las estaciones meteorológicas del atlas climatológico del IMN (Figura 2), los datos proporcionados por la capa del SNIT y los datos de WorldClim (promedios 1970 – 2020). De esta forma se construye el perfil de la precipitación promedio mensual para la zona de estudio para un periodo prolongado de años. Se observa una tendencia a lo largo del año que en la estación de Sixaola (parte baja de la cuenca) presenta precipitaciones menores, en cambio las estaciones del Aeropuerto Internacional de Limón e Hitoy Cerere son mayores

principalmente en los meses de enero y mayo, e incrementándose Manzanillo en julio con 409,9 mm y la de Limón con 455 mm. Las menores lluvias se presentan por lo general en la estación de Sixaola con una disminución marcada en setiembre y octubre (114,4 mm y 128 mm respectivamente).

En la Figura 3 se observa la precipitación media mensual según el tipo de fuente, destacando que los meses con mayor precipitación corresponden a mayo, julio y octubre, con más de 300 mm/mes. Por otra parte, los meses de febrero y marzo no superan los 150 mm/mes, representando los meses con menor precipitación.

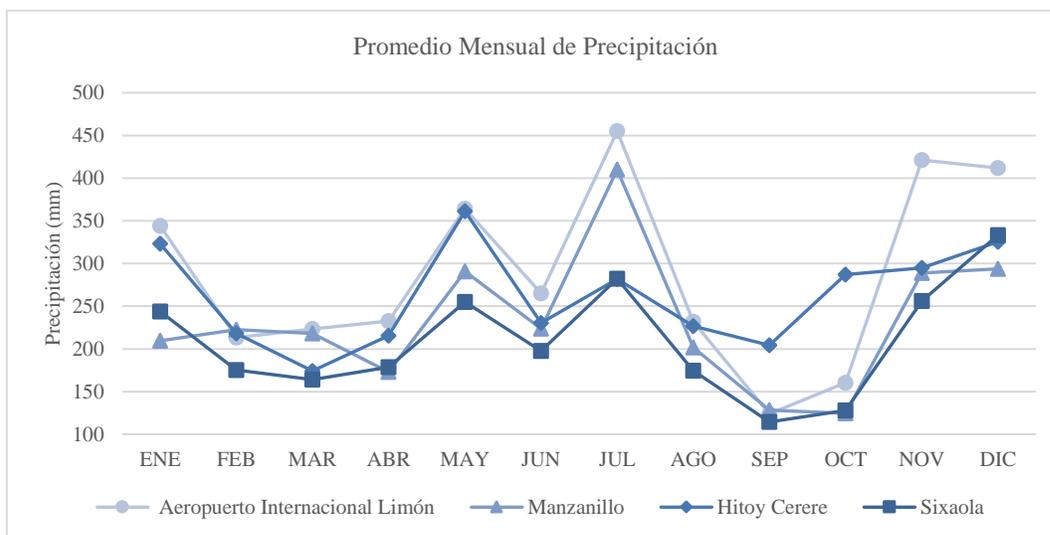


Figura 2. Precipitación promedio mensual de estaciones del IMN

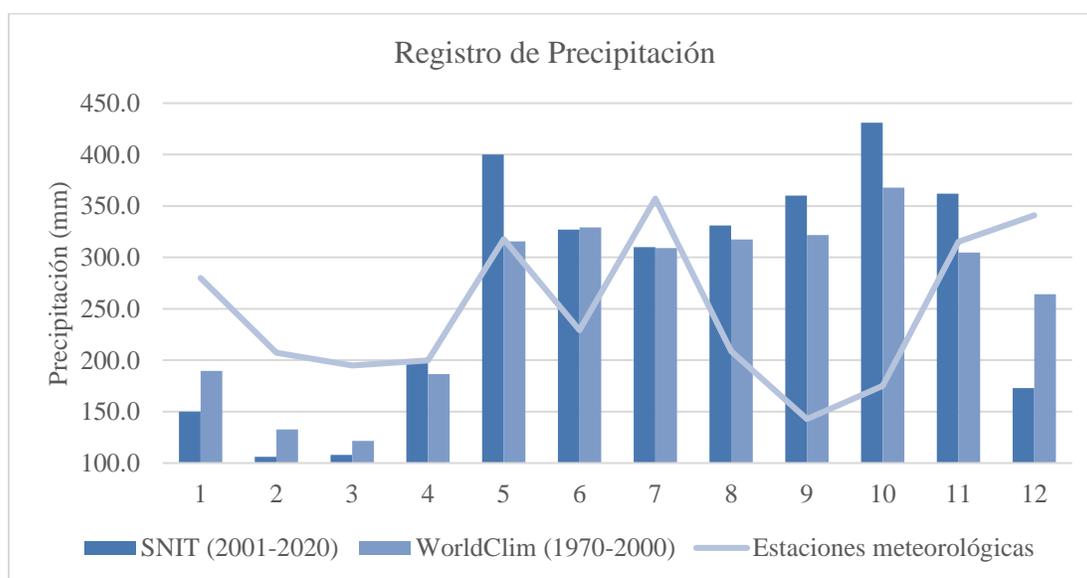


Figura 3. Precipitación mensual promedio. Fuente: IMN, 2018. SNIT, 2020. WorlClim, 2000.

2.3.2 Temperatura

Se utilizan los datos promedio de todas las estaciones meteorológicas mencionadas anteriormente y los datos de WorldClim¹ para el periodo 1970-2000. La diferencia entre los datos registrados por las estaciones y los proporcionados por WorldClim es de aproximadamente 5 °C, obteniendo las temperaturas más altas con las estaciones meteorológicas. A continuación, en las Figuras 4, 5 y 6, se muestran las temperaturas promedio, máxima y mínima mensuales y su comportamiento a través del año.

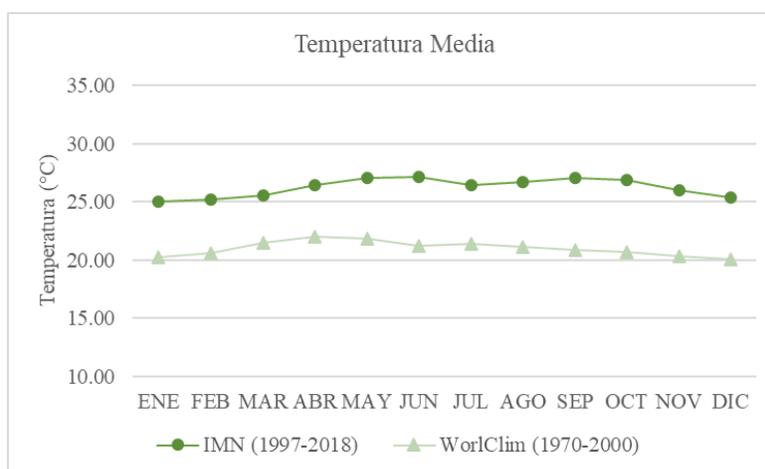


Figura 4. Temperatura promedio mensual para las estaciones indicadas. Fuente: IMN, 2018. WorldClim, 2000.

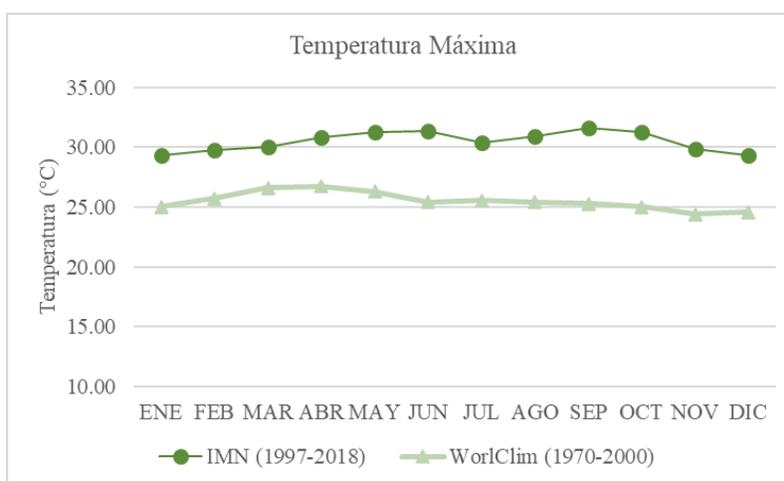


Figura 5. Temperatura máxima promedio mensual para las estaciones indicadas. Fuente: IMN, 2018. WorldClim, 2000.

¹WorldClim - Global Climate Data, información gratuita para modelos ecológicos y de SIG. Recopila información de bases de datos climáticos nacionales e internacionales para procesarlas y ponerlas a disposición en forma de capas de información (resolución 1km).

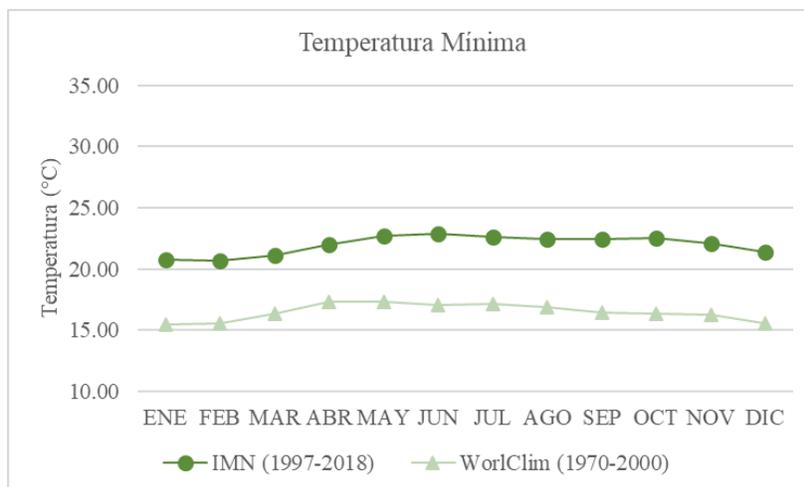


Figura 6. Temperatura mínima promedio mensual para las estaciones indicadas. Fuente: IMN, 2018. WorldClim, 2000.

2.3.3 Humedad

La humedad relativa es la relación porcentual entre el vapor de agua que contiene una masa de aire y la cantidad de vapor de agua que necesitaría esa misma masa para estar saturada a la misma temperatura. En los meses de enero, julio, noviembre y diciembre se tiene que, en un periodo de 21 años, la humedad relativa supera el 88% (Figura 7). Los meses con mayor humedad relativa coinciden con los meses de mayor precipitación en la zona, debido a que entre más alta sea la humedad, las probabilidades de lluvia aumentan.

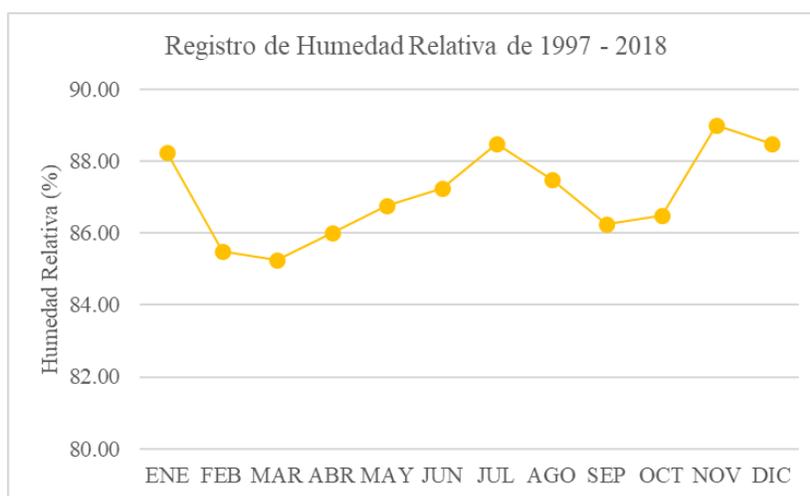


Figura 7. Humedad relativa mensual para las estaciones meteorológicas. Fuente: IMN, 1971-1996.

2.3.4 Evapotranspiración

La evapotranspiración es la pérdida de la humedad del suelo debido a la evaporación y la transpiración de la vegetación. En el siguiente gráfico se muestra la evapotranspiración potencial mensual promedio para el área de estudio. Los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre son los que presentan menor evapotranspiración, mientras que para el resto de los meses del año se tiene una evapotranspiración de 140 a 150 mm/mes.



Figura 8. Evapotranspiración potencial mensual promedio para el área de estudio. Fuente: SNIT, 2020.

2.3.5 Riesgo a inundaciones

La cuenca del Río Sixaola es una zona vulnerable a inundaciones y deslizamientos, lo que la coloca como una zona de alto riesgo ante el cambio climático. En la Figura 9 se muestra un mapa del riesgo de deslizamiento en la zona, de la cual destaca que la mayor parte del área de estudio hacia el norte tiene una vulnerabilidad alta y moderada a deslizamientos, mientras que hacia el sur la vulnerabilidad es muy baja (Rojas, 2011).

Por otra parte, la Comisión Nacional de Emergencias (CNE) estableció un programa ante las inundaciones que se dan en las zonas relacionadas con la cuenca del Río Sixaola (Figura 10). Este programa beneficia a las comunidades de Chase, Delicias, Margarita, Olivia, Puerto Cocle, Paraíso y Bribri en nuestro país y las comunidades de Guabito y las Tablas en Panamá. Además, cuenta con catorce comités encargados del manejo ante cualquier emergencia que se dé en la zona, estos comités son liderados por el Comité Municipal de Talamanca (Baker, 2012). En este estudio realizado por la UNESCO, destacan que actualmente no se cuenta con un mapa de riesgo para esta zona, por lo que toda la organización para la respuesta a cualquier emergencia se fundamenta en el mapa de

amenazas, el cual se basa en los registros históricos de informes y eventos registrados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y la CNE.

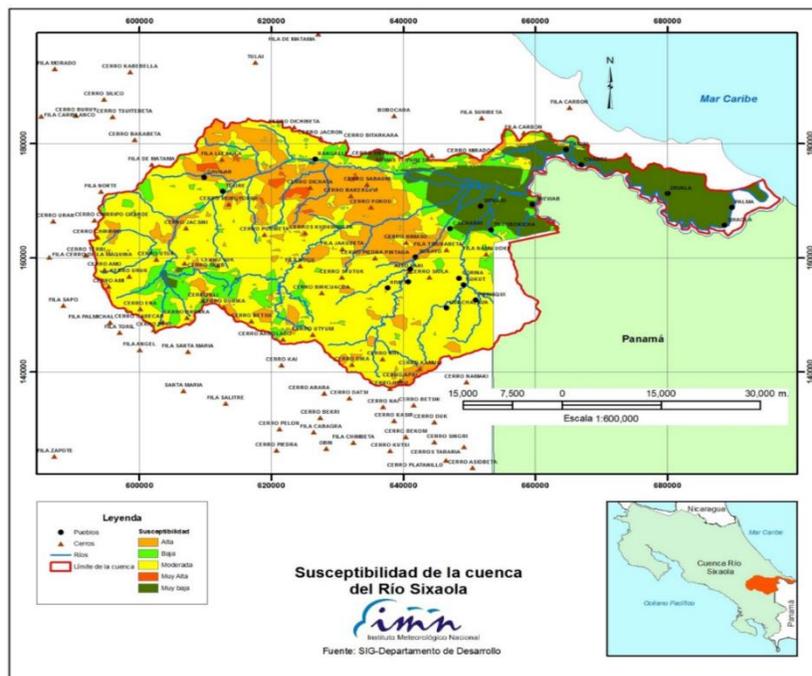


Figura 9. Mapa de Riesgo de deslizamiento en la cuenca del Río Sixaola, 2011. Fuente: Rojas, 2011.

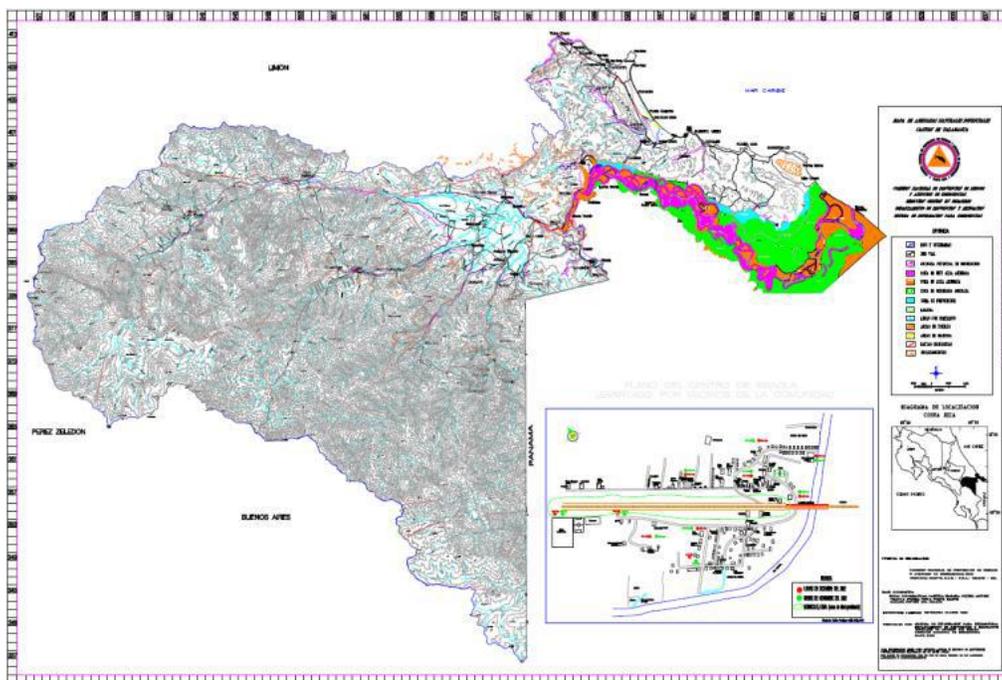


Figura 10. Mapa de Amenazas en Sixaola, 2012. Fuente: Campos Zumbado, 2012.

En contraste, el estudio realizado por Barrantes y Vargas (2011) estableció un mapa de amenazas (Figura 11), el cual se utiliza como referencia para determinar qué tipo de actividades se pueden realizar en la zona de acuerdo con su nivel de amenaza (A, B, C o D). El 20% de la zona descrita por estos autores pertenece a la categoría A, la cual se establece como una zona de alto riesgo y por ende debe utilizarse como área de conservación; el 31% corresponde a la categoría B (zona de alto riesgo), mientras que la categoría C representa el 45% del área y se clasifica como una zona apta para actividades agropecuarias y de uso urbano siempre y cuando las construcciones se mantengan sobre pilotes. Por último, la zona más segura representa solo el 4% del área, pero es apta para el desarrollo de cualquier actividad o infraestructura sin dejar de considerar los riesgos por inundación. Pero este mapa no se generó a partir de modelaciones hidrológicas e hidráulicas de la cuenca, sino de los registros observados de inundaciones anteriores de las zonas.

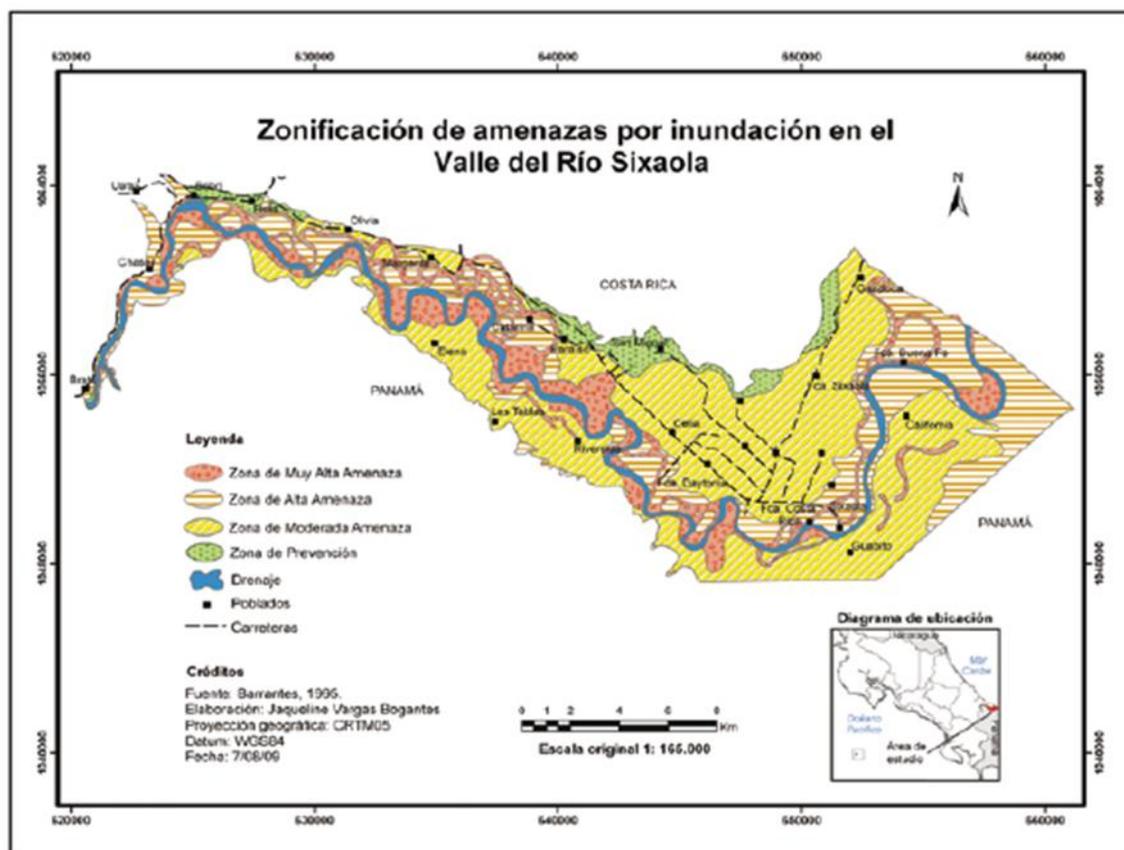


Figura 11. Zonificación de amenaza por inundaciones en el Valle del Río Sixaola. Fuente: Barrantes y Vargas, 2011.

2.4 Características morfométricas de las subcuencas y red de drenaje

2.4.1 Delimitación del área de estudio

La delimitación de las subcuencas del área de estudio se realizó mediante el uso de topografía del satélite de radar ALOS PALSAR perteneciente a la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (Jaxa), 2015, el cual tiene una resolución de 30 metros. Se utilizó el programa ArcGIS Pro y el ArcHydro Tools, en la Figura 12 se muestra la metodología utilizada para la delimitación de las subcuencas. Se inicia la delimitación con una herramienta para rellenar los sumideros que pueda tener el modelo de elevación digital. Después, se calculó las direcciones del flujo según la rosa de los vientos, luego se realizó el conteo de celdas acumuladas por tramo y la definición de los cuerpos de agua (1 km²) y la delimitación de las subcuencas, las líneas de drenaje y las distancias más lejanas de cada una de las subcuencas. Al final del proceso se determinaron 25 subcuencas.

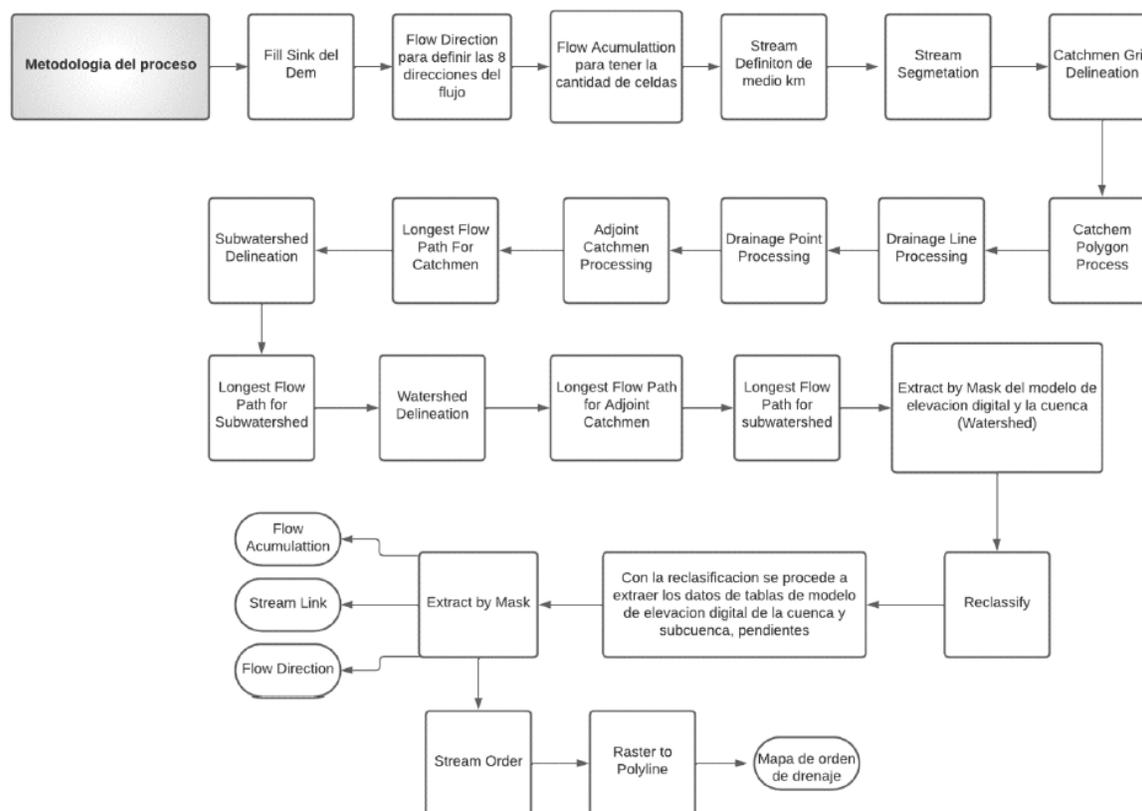


Figura 12. Metodología aplicada para el procesamiento de delimitación de cuencas mediante ArcGIS Pro.

2.4.2 Red Hidrográfica

La red hidrográfica está compuesta por los ríos principales de la cuenca del Sixaola, los cuales son Coen, Telire, Lari, Uren, Yorkin y Sixaola parte baja. Estos ríos principales fueron divididos en subcuencas para conformar un total de 25 subcuencas que se muestran en la Figura 13. Adicionalmente, se establecen parámetros para la clasificación de las subcuencas 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 el punto de salida de esta. En este caso la longitud es de 163.2 km.

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):

$$I_r = \frac{H_M - H_m}{1000 \cdot L_r} \quad \text{Ec. 1}$$

Considerando la longitud y la elevación máxima de 2954 m y la elevación mínima de 4 m, la I_r es de 0.018 o 1.81 %, lo que representa una clasificación de tipo de relieve plano, según la Tabla 3.

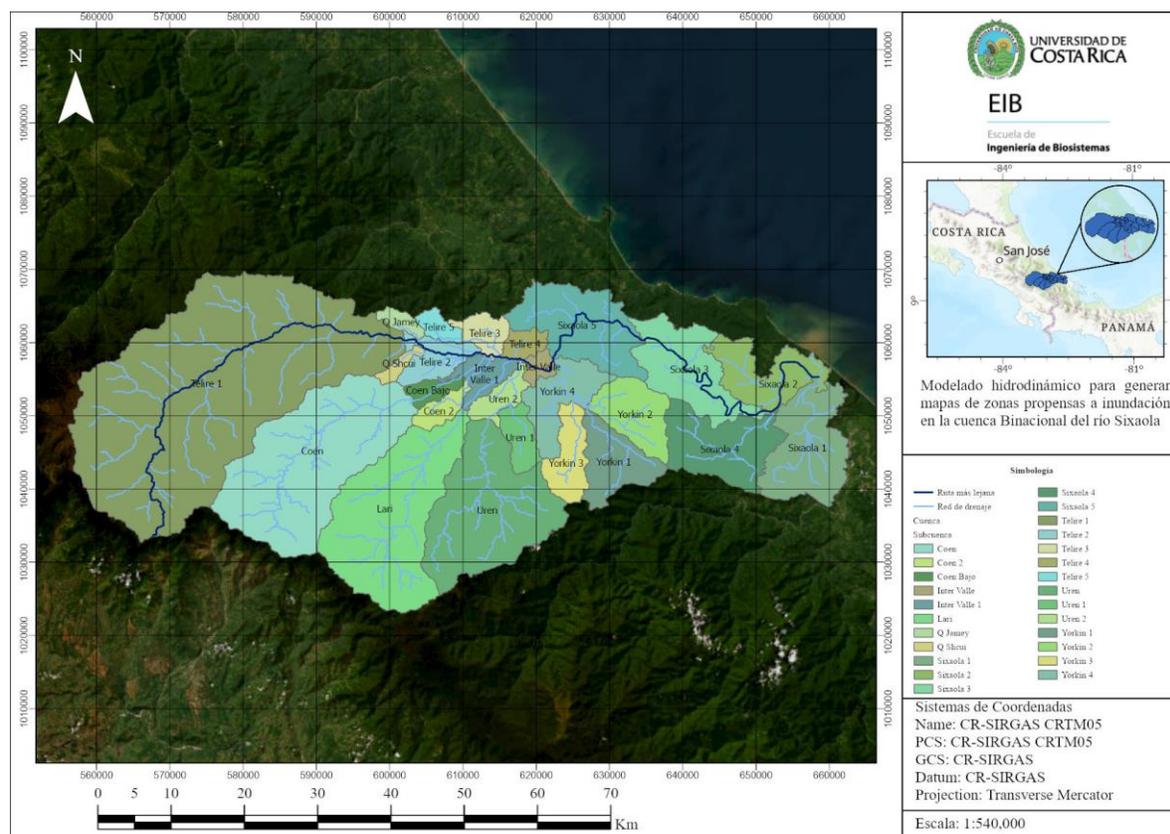


Figura 13. Subcuencas del Río Sixaola.

Tabla 3. Clasificación de las cuencas de acuerdo con la pendiente promedio de laderas.

Pendiente Media (%)	Tipo de Relieve
0 – 3	Plano
3 – 7	Suave
7 – 12	Mediano
20 – 35	Accidentado
35 – 50	Fuerte
50 – 75	Muy Fuerte
50 – 75	Escarpado
> 75	Muy Escarpado

Fuente: Soluciones Prácticas ITDG²

La *densidad de drenaje* (D_d) se define como la longitud total de cauces dentro de la cuenca en km (L_s) entre el área (A) total de drenaje en km²:

$$D_d = \frac{\sum L_s}{A} \quad \text{Ec. 2}$$

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.

2.4.3 Parámetros de forma de las subcuencas

El *factor de forma* relaciona los dos parámetros anteriores para definir la forma de la cuenca. Y se calcula como:

$$F = \frac{A}{P} \quad \text{Ec. 3}$$

El *coeficiente de compacidad o índice de Gravelius* (K_c). (I_c), es un 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:

² <http://www.itdg.org.pe/archivos/energia/hidrored2004.pdf>

$$I_c = \frac{P}{P_c} = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \approx 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ec. 4}$$

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

- 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. 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, esto trae consigo caudales picos más altos que suelen reflejarse en problemas de inundación en las partes bajas de la cuenca. En la siguiente tabla se muestran los parámetros de formas obtenidos para cada subcuenca.

Tabla 4. Parámetros de forma de las subcuencas.

Subcuenca	Área (km ²)	Factor de forma	Índice de compacidad	Forma	Clasificación
Telire 1	884.40	0.18	1.86	Muy alargada	rectangular
Coen	372.58	0.13	1.76	Muy alargada	rectangular
Lari	306.24	0.15	1.93	Muy alargada	rectangular
Uren	262.86	0.16	1.88	Muy alargada	rectangular
Telire 4	20.48	0.46	1.82	Alargada	rectangular
Uren 2	30.27	0.00	2.43	Muy alargada	rectangular
Uren 1	35.07	0.20	1.90	Muy alargada	rectangular
Telire 2	44.82	0.20	2.49	Muy alargada	rectangular
Telire 3	30.69	0.20	1.96	Muy alargada	rectangular
Yorkin 1	80.37	0.14	2.02	Muy alargada	rectangular
Yorkin 3	56.45	0.14	2.06	Muy alargada	rectangular
Yorkin 4	78.22	0.18	2.34	Muy alargada	rectangular
Inter Valle	14.60	0.22	1.97	Alargada	rectangular
Sixaola 2	91.57	0.15	2.92	Muy alargada	rectangular
Sixaola 1	142.54	0.19	2.35	Muy alargada	rectangular
Sixaola 3	132.89	0.12	2.58	Muy alargada	rectangular
Sixaola 4	126.64	0.22	2.20	Alargada	rectangular
Sixaola 5	148.44	0.21	2.20	Muy alargada	rectangular

Subcuenca	Área (km ²)	Factor de forma	Índice de compacidad	Forma	Clasificación
Q Jamey	14.05	0.18	1.91	Muy alargada	rectangular
Yorkin 2	78.35	0.13	1.68	Muy alargada	rectangular
Coen 2	23.78	0.12	2.05	Muy alargada	rectangular
Coen Bajo	19.22	0.24	2.07	alargada	rectangular
Inter Valle 1	35.33	0.46	2.58	alargada	rectangular
Telire 5	17.55	0.16	1.85	muy alargada	rectangular

2.4.4 Parámetros de relieve de las subcuencas

Los parámetros de relieve son los más importantes, puesto que el relieve de una cuenca puede tener mucha más influencia sobre la respuesta hidrológica, que la forma misma de la cuenca. Los resultados obtenidos para cada subcuenca se muestran en la Tabla 5 y en la Figura 14 y 15.

Tabla 5. Características topográficas de las subcuencas.

Subcuenca	Elevaciones (m)				Pendientes (%)				
	Min	Max	Promedio	DST	Percentil 90	Máxima	Promedio	DST	Percentil 90
Telire 1	166	3793	1691.6	777.3	2742	303.2	45.3	27.5	81.7
Coen	190	3274	1552.2	648.7	2372	255.0	50.0	25.8	84.2
Lari	138	3542	1618.0	712.4	2535	258.7	55.3	26.9	90.9
Uren	110	3494	1203.6	577.6	2018	241.9	51.4	25.1	84.8
Telire 4	45	397	188.0	81.8	288	95.8	17.6	13.1	35.6
Uren 2	44	601	126.7	76.2	237	102.6	13.8	13.6	33.4
Uren 1	77	1384	608.6	345.4	1081	159.7	34.2	19.3	59.5
Telire 2	63	951	218.9	177.6	520	141.0	18.0	20.5	47.3
Telire 3	49	544	201.2	127.2	381	125.2	19.9	18.8	46.7
Yorkin 1	75	1464	647.4	366.0	1190	189.9	35.0	18.8	59.6
Yorkin 3	91	1464	795.9	399.3	1265	142.1	36.6	18.5	61.5
Yorkin 4	39	1407	355.5	285.5	757	146.5	31.3	18.5	56.3
Inter Valle	33	329	132.7	66.4	224	150.0	20.5	16.2	40.7
Sixaola 2	-8	128	19.5	18.7	42	62.3	6.0	6.5	15.1
Sixaola 1	-9	381	20.6	35.5	36	106.1	6.4	9.7	16.5
Sixaola 3	0	899	83.4	140.0	267	146.1	13.3	18.5	40.4
Sixaola 4	3	813	179.8	185.8	458	145.6	20.8	19.4	47.9
Sixaola 5	10	863	210.8	180.4	481	169.0	24.6	20.4	53.0
Q Shcui	137	1040	523.8	231.1	846	172.3	39.7	25.5	75.6
Q Jamey	154	746	472.7	113.2	600	139.3	32.8	20.9	62.5
Yorkin 2	71	905	438.4	186.1	702	117.8	30.2	16.2	52.2

Subcuenca	Elevaciones (m)					Pendientes (%)			
	Min	Max	Promedio	DST	Percentil 90	Máxima	Promedio	DST	Percentil 90
Coen Bajo	87	817	285.5	162.6	534	189.6	34.1	27.5	72.5
Inter Valle 1	41	294	84.0	26.5	116	105.1	5.8	7.2	12.7
Telire 5	72	700	288.1	153.9	514	139.8	29.0	21.7	59.1

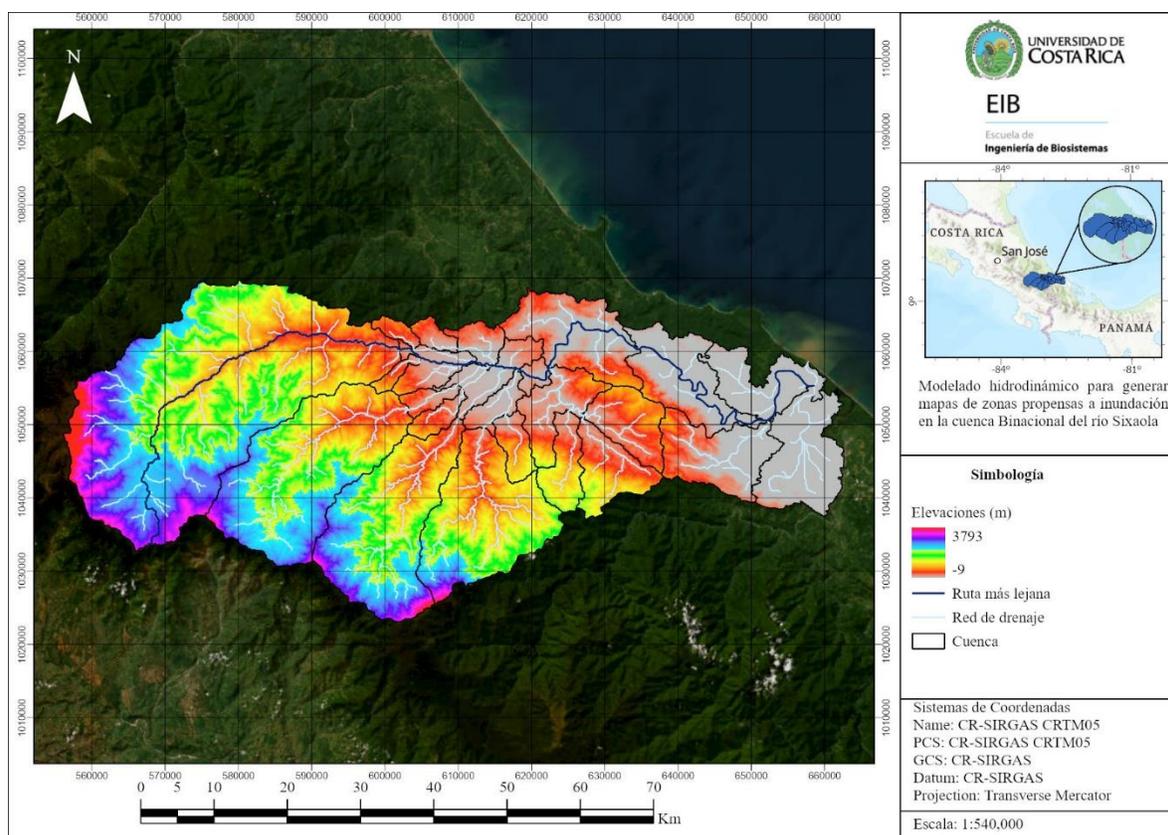


Figura 14. Elevaciones de las subcuencas.

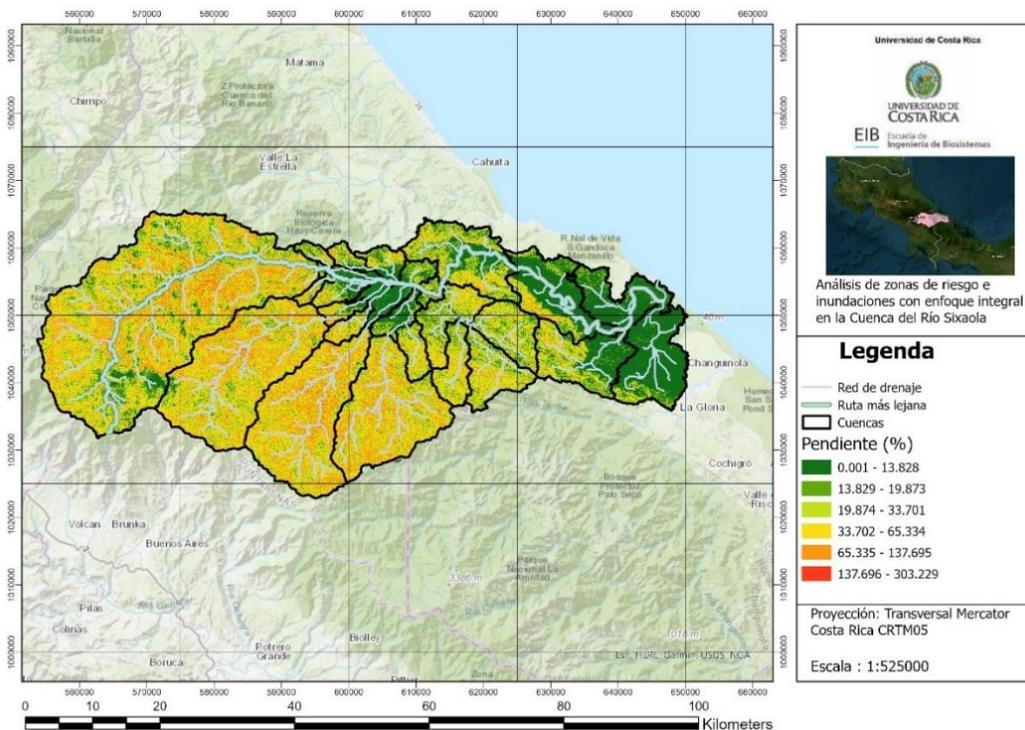


Figura 15. Mapa de pendientes en la zona de estudio.

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 es de 900 m, la cual equivale a la elevación correspondiente al 50% del área de la cuenca (Figura 16).

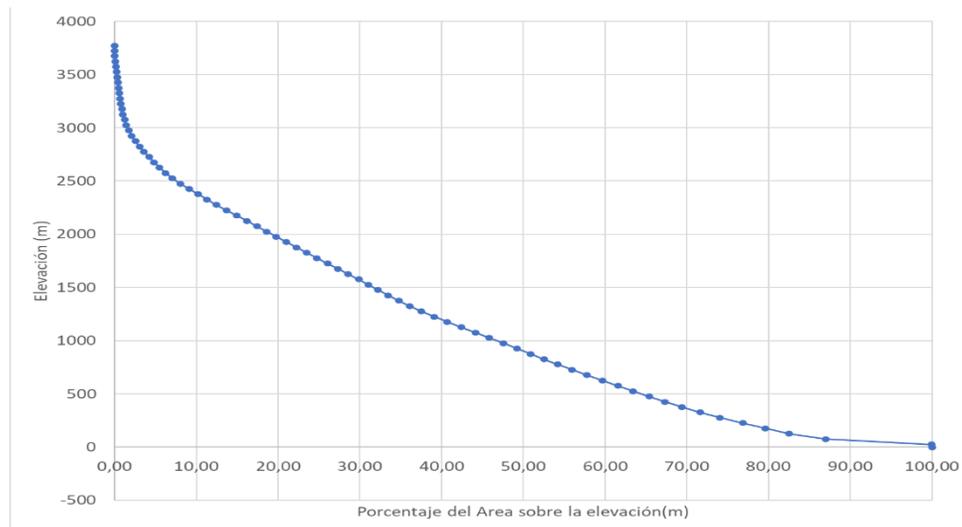


Figura 16. Curva hipsométrica de la cuenca del río Sixaola.

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:

$$I_p = \sum_{i=2}^n \sqrt{\beta_i (a_i - a_{i-1})} \cdot \frac{1}{\sqrt{L}} \quad \text{Ec. 5}$$

donde:

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.

$$\beta_i = \frac{A_i}{A_T} \quad \text{Ec. 6}$$

donde:

A_i = área i entre cotas de curvas de nivel

A_T = área total de la cuenca

2.5 Cobertura

A partir de los objetivos y el enfoque del estudio, se establece el concepto de suelo por medio del análisis que toma como definición aceptada por agrónomos, forestales y edafológicos: “El suelo es un conjunto de unidades naturales que ocupan las partes superficiales terrestres que soportan las plantas y en general todo tipo de infraestructura construida para uso de seres humanos y cuyas propiedades se deben a los efectos combinados del clima y de la materia viva sobre la roca madre en un periodo de tiempo y relieve determinado” (adaptado y traducido de Soil Survey Staff, 1951).

En base al conocimiento sobre las características de los suelos y a su capacidad de infiltración y retención de agua, se puede promover un manejo y uso sostenible de este generando un desarrollo armónico con la naturaleza mediante la disminución de daños por el aumento actual de la escorrentía generada por las actividades humanas. A partir de lo anterior, es importante generar una caracterización de las condiciones actuales de la zona para así determinar si existe o no un sobreuso del sitio en estudio. Para esto se determina la cobertura donde la mayoría de su extensión corresponde a bosques. En cuanto a la actividad agrícola fundamental para el sustento y progreso de la zona, hay cultivos mixtos como

plátano/pastos y banano intensivo. Es de suma importancia la gestión del recurso hídrico para promover el aprovechamiento sostenible y conservación del suelo.

Esta sección contiene una caracterización del uso del suelo de la zona de estudio utilizando fotografías aéreas, aportadas por AirBus del 2020 y 2022 y Maxar de DigitalGlobe (2020). En la Tabla 6 se muestran el tipo de cobertura y su proporción dentro de cada subcuenca, mientras que en la Figura 17 y 18 se muestra la distribución del tipo de cobertura en toda la cuenca.

Tabla 6. Porcentaje y área por subcuenca según tipo de cobertura presente.

SubCuenca	Tipo de cobertura	Cobertura	Área (km²)
Inter Valle	Agua	0.89%	0.31
	Bosque	29.64%	10.48
	Cultivos mixtos (plátano, pastos, etc)	59.21%	20.94
	Pasto con arboles	7.71%	2.73
	Pasturas	0.13%	0.05
	Playón de ríos	2.42%	0.86
Río Coen	Agua	0.01%	0.03
	Bosque	99.22%	412.01
	Bosque con claros (ralo)	0.01%	0.05
	Cultivos mixtos (plátano, pastos, etc)	0.57%	2.35
	Páramo	0.02%	0.07
	Pasto con arboles	0.15%	0.62
	Playón de ríos	0.04%	0.16
Río Lari	Bosque	99.97%	306.02
	Pasto con arboles	0.01%	0.03
	Pasturas	0.01%	0.04
	Playón de ríos	0.01%	0.02
Río Sixaola	Agua	1.91%	12.55
	Banano en barbecho (renovación o abandonado)	0.15%	1.00
	Bosque	33.75%	221.54
	Bosque con claros (ralo)	2.55%	16.75
	Bosque de tierras bajas (anegadas)	10.16%	66.68
	Bosque mezclado con palma	4.50%	29.54
	Cultivo de banano intensivo	11.34%	74.43
	Cultivos mixtos (plátano, pastos, etc)	23.69%	155.50
	Pasto con arboles	3.25%	21.34
	Pasturas	6.70%	43.99
	Playón de ríos	0.15%	1.00
	Urbano/Suelo desnudo	0.41%	2.70
Rural	1.42%	9.35	
Río Telire	Agua	0.20%	2.01
	Bosque	94.67%	965.95
	Cultivos mixtos (plátano, pastos, etc)	3.25%	33.21
	Páramo	1.55%	15.79

SubCuenca	Tipo de cobertura	Cobertura	Área (km ²)
	Pasto con arboles	0.16%	1.63
	Pasturas	0.09%	0.96
	Playón de ríos	0.04%	0.37
	Rural	0.04%	0.37
Río Uren	Agua	0.02%	0.08
	Bosque	96.09%	315.11
	Bosque con claros (ralo)	0.11%	0.37
	Cultivo de banano intensivo	0.02%	0.07
	Cultivos mixtos (plátano, pastos, etc)	3.19%	10.47
	Pasto con arboles	0.33%	1.08
	Pasturas	0.09%	0.29
	Playón de ríos	0.13%	0.42
	Rural	0.01%	0.03
	Río Yorkin	Agua	0.06%
Bosque		97.17%	284.84
Bosque con claros (ralo)		0.65%	1.92
Cultivos mixtos (plátano, pastos, etc)		0.17%	0.48
Pasto con arboles		1.47%	4.32
Pasturas		0.38%	1.11
	Playón de ríos	0.10%	0.29

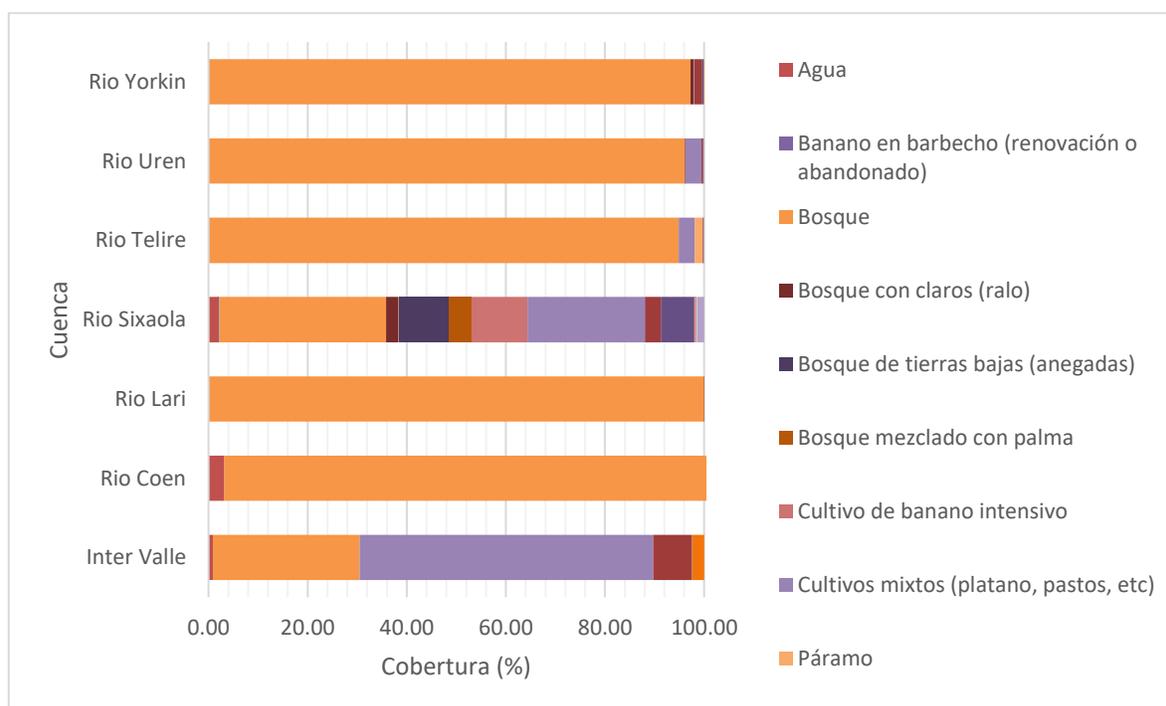


Figura 17. Uso de suelo por cuenca.

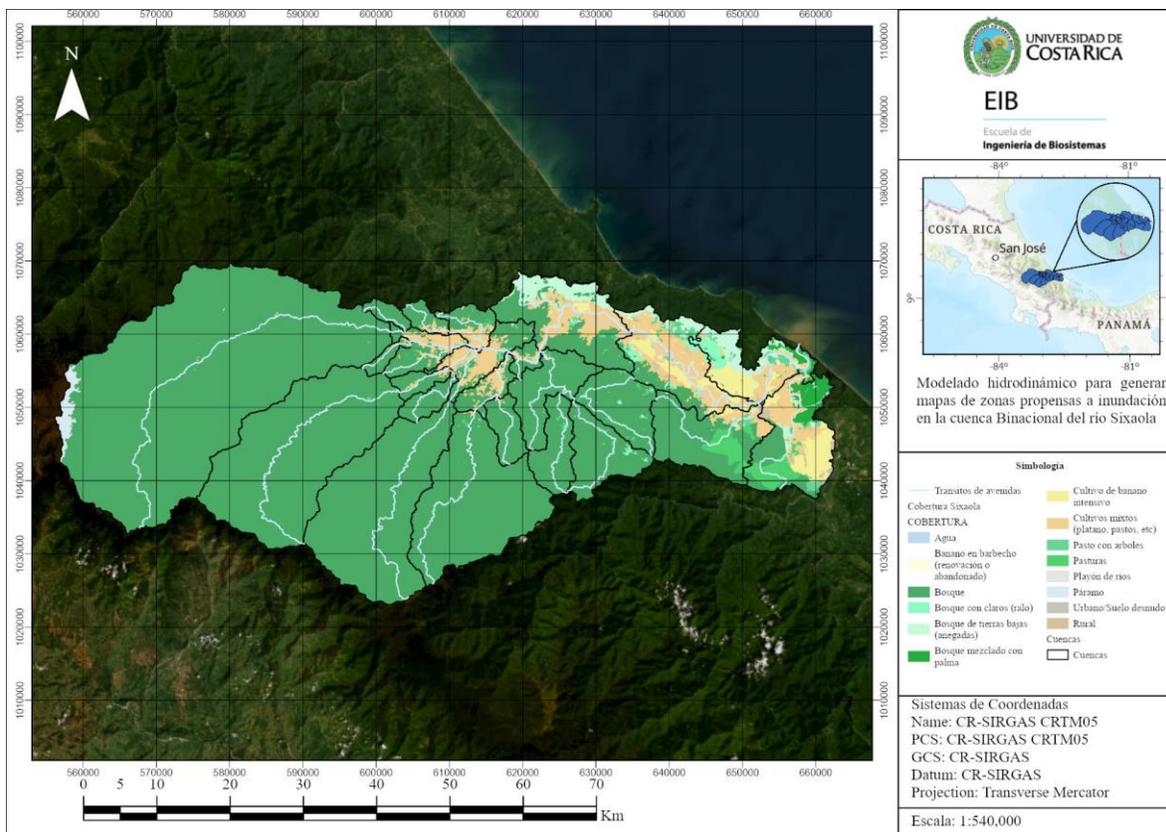


Figura 18. Mapa de uso del suelo en la zona de estudio.

2.6 Edafología de suelos

La clasificación de los suelos parte de los atributos almacenados en la base de datos del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA, 2022), como, por ejemplo, porcentaje de arena, limo, arcilla, materia orgánica, profundidad del perfil, capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

En la zona de estudio, el suelo se conforma principalmente de las fracciones de arena y arcilla, ya que representan el 40% y 38% de la composición del suelo (Figura 19). Este porcentaje se asocia al estudio a diferentes profundidades en distintos puntos de la cuenca, sin embargo, el promedio porcentual de las fracciones en los primeros 20 cm son muy similares. En cuanto a la materia orgánica, los suelos de la zona presentan un $3.41 \pm 1.8\%$ en su composición.

Se utilizan las ecuaciones de pedotransferencia de suelos registradas y analizadas en el programa “Soil Water Characteristics” de la Universidad Estatal de Washington. Las ecuaciones de pedotransferencia está basadas en una base de datos de más de 50 mil suelos de Estados Unidos, donde es posible predecir la conductividad hidráulica saturada a partir de los porcentajes de arena, arcilla, limo, rocas y materia orgánica para cada uno de los estratos

de suelo reportados en las calicatas. Posteriormente, se calcula la conductividad saturada promedio del suelo para ser comparada con los grupos hidrológicos.

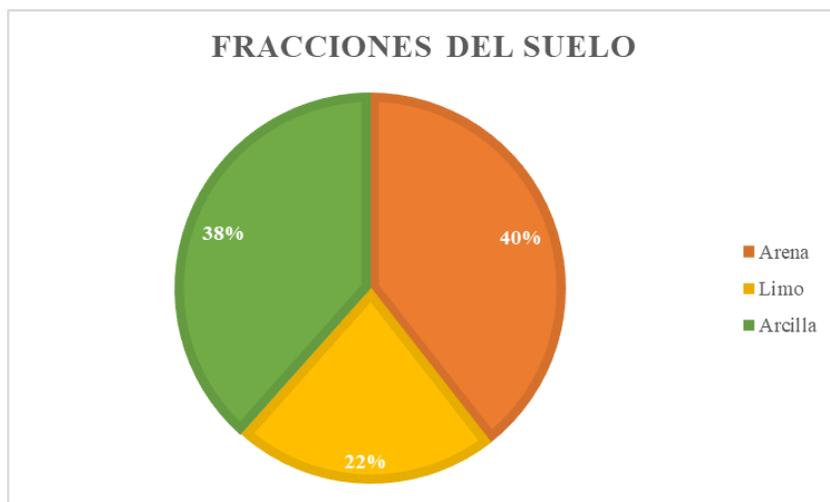


Figura 19. Composición promedio de las fracciones del suelo que conforman la Cuenca del Río Sixaola.

En la Tabla 7 se muestran características importantes según los análisis realizados a las calicatas con influencia en la zona de estudio. La conductividad hidráulica saturada (k) se obtuvo con el software Soil Water Characteristics (Whashington State University) para cada estrato y a partir de la siguiente ecuación se obtuvo la conductividad hidráulica saturada efectiva (k_{ef}) promedio considerando la profundidad de cada estrato (L) y se le asigna de esta forma el grupo hidrológico:

$$k_{ef} = \frac{L_1 + L_2 + L_i}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_i}{k_i}} \quad \text{Ec. 7}$$

En la Figura 20 se muestra la distribución de los tipos de suelos que conforman la cuenca del Río Sixaola, del cual destaca la presencia de ultisoles e inceptisoles en la mayor parte de la cuenca. En cuanto a los grupos hidrológicos, predominan los grupos C y D (Figura 21).

Tabla 7. Variables de interés para cada calicata.

ID_Calicata	Profundidad de suelo (cm)	Densidad aparente (g/cm³)	Densidad de partícula (g/cm³)	k efectiva (mm/h)	Grupo Hidrológico
183	85	1.04	2.45	10.86	A
184	110	0.85	2.36	10.16	A
185	65	0.98	2.41	9.10	A
186	105	1.07	-	4.29	B
187	70	0.99	2.49	5.97	B
189	130	1.22	2.54	40.61	A
391	120	-	-	0.91	D
490	68	1.08	1.89	3.54	C
491	130	1.15	2.05	11.71	A
492	67	1.10	2.08	4.25	B
493	120	1.03	2.05	2.06	C
494	120	1.18	2.15	6.12	B
495	120	1.06	2.15	2.99	C
496	120	0.74	2.25	0.34	D
497	120	1.10	2.23	0.70	D
498	120	1.14	2.18	9.60	A
499	120	1.03	2.10	1.66	C
500	68	1.10	2.15	7.66	B
501	110	1.10	2.13	2.53	C
502	40	1.13	2.17	2.83	C
503	78	1.05	2.05	1.51	C
718	120	1.22	2.33	0.75	D
719	120	0.75	1.97	0.22	D
720	120	0.87	1.99	0.14	D
721	120	0.91	2.02	0.09	D
722	120	0.92	2.14	2.76	C
723	120	1.09	2.17	0.19	D
725	120	1.07	2.21	0.18	D
726	120	1.01	2.09	4.77	B
727	120	0.70	2.02	0.56	D
729	80	0.98	1.93	3.13	C
730	120	1.07	2.07	1.21	C

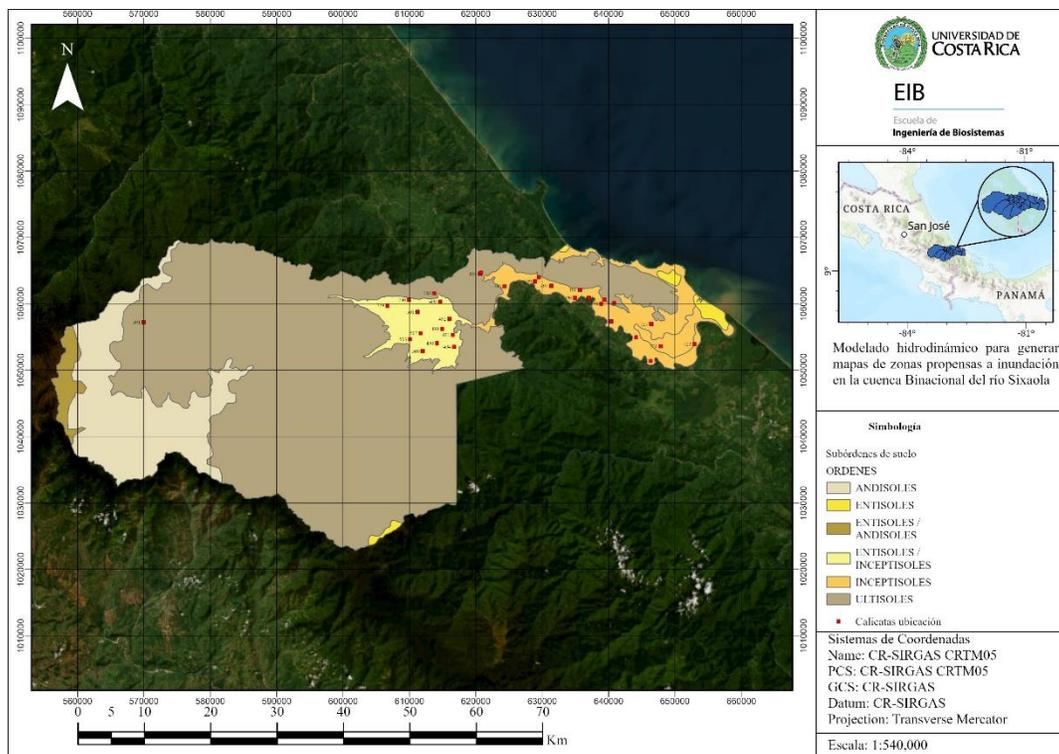


Figura 20. Mapa de la clasificación de suelos y los puntos del CIA.

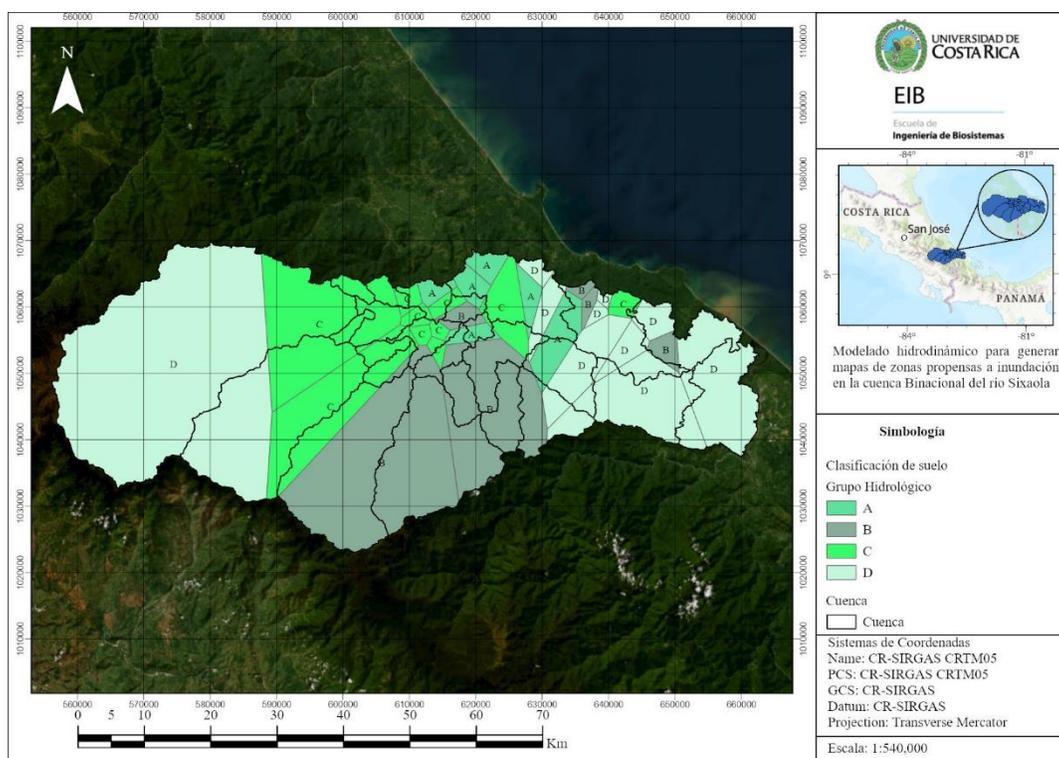


Figura 21. Distribución de los grupos hidrológicos en la cuenca del Río Sixaola.

3 Análisis hidrológico

La modelación hidrológica de cuencas es un proceso que permite simular el comportamiento del ciclo hidrológico en una cuenca, con el fin de entender y predecir el movimiento y almacenamiento del agua. Esto incluye la precipitación, la infiltración, la escorrentía, la evapotranspiración y otros procesos relacionados. Existen diferentes enfoques y modelos utilizados para este propósito, como los modelos físicos, conceptuales y empíricos.

En el caso de aplicaciones de planificación y gestión de riesgos asociados a las inundaciones permite tener un panorama amplio para ejecutar un conjunto de acciones que permiten anticipar, reducir y mitigar los efectos negativos de las inundaciones en áreas vulnerables. Esta planificación es crucial para proteger vidas, infraestructuras y bienes, así como para asegurar un desarrollo urbano y rural sostenible.

Los modelos hidrológicos (como HEC-HMS) permiten simular y predecir la magnitud y frecuencia de eventos hidrológicos extremos, como lluvias intensas o caudales máximos, para anticiparse a su impacto y determinar los lugares donde es más probable que ocurra una inundación, haciendo posible mitigar riesgos, mejorar la resiliencia y garantizar un manejo adecuado de los recursos hídricos en zonas vulnerables.

La hidrología es un tema multidisciplinario que trata la ocurrencia, La circulación y la distribución de las aguas del planeta Tierra. Las descargas de una corriente fluvial son una función de las características de la cuenca, así como las condiciones meteorológicas locales.

El propósito de este capítulo es detallar las metodologías para estimar las descargas pluviales en la cuenca del río Sixaola, Dónde se proporcionará ideogramas que indican el valor de la descarga máxima o caudal de diseño a ser utilizado para determinar los niveles de inundación para diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años).

3.1 Metodología del análisis hidrológico

El Sistema de Simulación Hidrológica (HEC-HMS, por sus siglas en inglés, Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) fue creado por el USACE y es una herramienta ampliamente utilizada para simular los procesos de precipitación-escorrentía del ciclo hidrológico en cuencas hidrográficas, así como lo eventos extremos, como lluvias intensas para las inundaciones resultantes. La aplicación puede ser utilizada en cualquier área geográfica y para la solución de una amplia variedad de problemas. Los hidrogramas calculados pueden ser utilizados directamente o en un conjunto de otras aplicaciones como modelos hidráulicos computarizados para estudiar la disponibilidad del agua, drenajes urbanos predicción de inundaciones, impactos de futuros proyectos, diseño de vertedores, diques, estudios de reducción de daños por inundaciones análisis de planicies inundables, entre otros.

HEC-HMS contiene varios métodos hidrológicos para determinar las pérdidas de lluvia y calcular la escorrentía. Entre ellas está el método del NRCS del Informe Técnico N° 55 (TR-55) para un impulso de lluvia. También contiene otras técnicas, las cuales se ven en ocasiones limitadas en su uso debido a la falta de información requerida para su aplicación, como es el caso de la cuenca del Río Sixaola.

Para eventos extremos, HEC-HMS se enfoca en varios componentes y variables clave que deben configurarse y calibrarse de ser posible cuidadosamente para obtener resultados precisos.

Uno de los pasos de mayor importancia en un estudio hidrológico es la determinación espacial del área de drenaje de los puntos de interés, a esta extensión territorial se le conoce como cuenca hidrográfica, área de drenaje o área de captación. Los límites del área de captación fueron identificados y provistos mediante una representación gráfica según se describe en la Sección 2.4.1, utilizando el MED del Jaxa con una resolución de 30 metros mediante una delimitación automática con sistemas de información geográfica. A pesar de ser una herramienta de trabajo poderosa los GIS tienen la limitación de que dependen de la decisión y resolución de los datos geográficos que se utilizan. Si los datos no son correctos, los resultados, tampoco lo serán. En ocasiones los datos son correctos, pero la resolución no es la adecuada y se requiere de trabajo de campo para poder obtener la información necesaria y realizar correcciones manuales. Por ejemplo, en las planicies de inundación el MED pierde precisión al delimitar una cuenca y definir la red de drenaje por las bajas pendientes, por lo que se realizan correcciones manuales en esas áreas a fin de que los patrones de drenaje naturales causados por los sistemas de drenaje sean lo más apegado a la realidad de la cuenca hidrográfica. Al final del proceso se obtuvieron un total de 25 subcuencas las cuales se detallan en la Figura 13 de la Sección 2.4.2.

En las siguientes secciones se presentan las variables y componentes principales del modelo HEC-HMS para cada una de las subcuencas y tránsitos de avenida con el fin de realizar la simulación hidrológica para eventos extremos.

3.1.1 Análisis de lluvia para obtención de caudales

Cuando el registro de datos históricos de caudales máximos no sea adecuado para realizar un análisis de frecuencia, o no existen datos históricos, se utilizan datos de lluvia para generar caudales mediante la utilización de modelos hidrológicos computarizados de precipitación-escorrentía. Los datos de lluvia que alimentan los modelos se usan para estimar los caudales necesarios para generar el análisis hidráulico de las planicies de inundación. Datos históricos de lluvia son usualmente utilizados para reconstruir eventos pasados determinar la respuesta hidrológica de un área de captación ante avenidas máximas con ciertas recurrencias y duraciones de lluvia.

El modelo requiere un conjunto de datos que represente la lluvia extrema para el evento a simular. Esto puede derivarse de curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia), curvas LDF (Lámina-Duración-Frecuencia) o eventos históricos con periodos de retorno específicos (e.g., 100 años). La zona en particular cuenta con información de curvas IDF generadas previamente por el IMN (Rojas, 2011) para la estación 87-13 Sixaola con 15 años de registro y la 85-21 Hitoy Cerere con 13 años de registro para intensidades solamente de 5, 10, 15 y 30 min (Tabla 8). Además, la estación mecánica 81-03 de Aeropuerto Limón tiene un registro de 30 años (Rojas, 2011) y presenta duraciones desde los 5 a 1440 minutos.

Tabla 8. Láminas máximas de lluvia para diferentes duraciones y periodos de retorno (Rojas, 2011).

Periodo de retorno					
Duración (min)	5	10	25	50	100
87-13 Sixaola³					
5	10.76	12.03	13.64	14.83	16.01
10	18.41	20.53	23.20	25.19	27.16
15	24.24	26.91	30.28	32.78	35.27
30	39.28	44.58	51.27	56.24	61.16
85-21 Hitoy Cerere³					
5	14.6	17.4	20.9	23.5	26.0
10	24.2	28.3	33.4	37.2	41.0
15	31.2	36.0	42.1	46.6	51.0
30	48.3	56.1	66.1	73.4	80.7

Dada la escasa información de estaciones meteorológicas en la cuenca del Sixaola se trabaja con datos de precipitación satelital de PERSIANN-DIR-Now o PDIR-Now (Estimación de precipitación a partir de información de teledetección mediante redes neuronales artificiales - Tasa de lluvia infrarroja dinámica- Casi en tiempo real) con una resolución espacial de aproximadamente $0.04^\circ \times 0.04^\circ$ (4 km x 4 km) y temporal de una hora. El producto de precipitación satelital fue desarrollado por el Centro de Hidrometeorología y Teledetección (CHRS) de la Universidad de California, Irvine (UCI). PDIR-Now se ha implementado en el sistema global de monitoreo de precipitación satelital en tiempo real.

La principal ventaja de PDIR-Now, en comparación con otros conjuntos de datos de precipitación casi en tiempo real, es que se basa en las imágenes IR muestreadas de alta frecuencia; en consecuencia, la latencia de PDIR-Now desde el momento en que se producen las lluvias es muy corta (15-60 minutos). Además, PDIR-Now tiene en cuenta los errores e

³ Rojas Morales, N., 2011. Curvas de Intensidad Duración Frecuencia de algunas estaciones meteorológicas automáticas.

incertidumbres que resultan del uso de imágenes IR mediante la adopción de una variedad de técnicas, la más notable es el desplazamiento dinámico de las curvas (Tb-R) utilizando la climatología de las precipitaciones. La corta latencia de PDIR-Now hace que el conjunto de datos sea adecuado para aplicaciones hidrológicas casi en tiempo real, como la predicción de inundaciones y el desarrollo de mapas de inundaciones por inundaciones. Además, hay varios estudios que indican el potencial de utilizar el algoritmo PDIR para reconstruir estimaciones históricas de precipitación a alta resolución espacio-temporal (Nguyen, P., et.al., 2020).

PERSIANN-DIR-Now proporciona una serie de datos retrospectivos desde el año 2000 en adelante, lo que permite analizar eventos pasados y realizar estudios climáticos y construir curvas IDF. Para generar las curvas en este caso lámina- duración- frecuencia (LDF) se obtiene los datos de los centroides principales de las subcuencas a fin de conocer las diferencias en cada una. A partir de los datos satelitales, se identifican los **eventos máximos anuales de precipitación** para diferentes duraciones (por ejemplo, 1 hora, 2, 3, 6, 12 y 24 horas) y se genera las series de máximos anuales. Posteriormente se aplica un análisis de frecuencia aplicando distribuciones de probabilidad de Valor Extremo tipo I o Gumbel. Estos métodos permiten extrapolar los eventos extremos más allá de lo que se ha registrado en los datos satelitales. Una vez que se tienen los datos de eventos extremos para diferentes duraciones, se construyen las curvas LDF, que relacionan la lámina de la precipitación con la duración del evento para diferentes periodos de retorno (como 2, 5, 10, 25, 50, 100 años).

Aunque los datos de precipitación satelital pueden ser muy útiles, es común que se combinen con datos de estaciones meteorológicas terrestres (si están disponibles) para mejorar la precisión. Se pueden aplicar **algoritmos de corrección de sesgo** para ajustar las diferencias entre los datos satelitales y los registros en tierra. Algunos estudios han demostrado que los satélites pueden subestimar o sobrestimar las lluvias muy intensas, lo que puede requerir ajustes para obtener curvas LDF más precisas. Sin embargo, un estudio realizado en México por Hong, et al., (2007), mostró una buena concordancia entre los datos satelitales y los medidos en estaciones terrestres a escalas diarias y horarias. Sin embargo, la precisión varía según la región, la topografía y la intensidad de la lluvia. PERSIANN-CCS por ejemplo tiende a subestimar la precipitación extrema, pero es útil en áreas no monitoreadas por estaciones meteorológicas.

En este caso, se calcula una curva LDF por subcuenca considerando el centroide de cada una (Figura 22). Para cada uno de estos puntos se descargaron datos satelitales de PERSIANN-DIR Now y la corrección por sesgo se realizó mensual utilizando los boletines meteorológicos publicados para cada año por el IMN (2024) (Tabla 9).

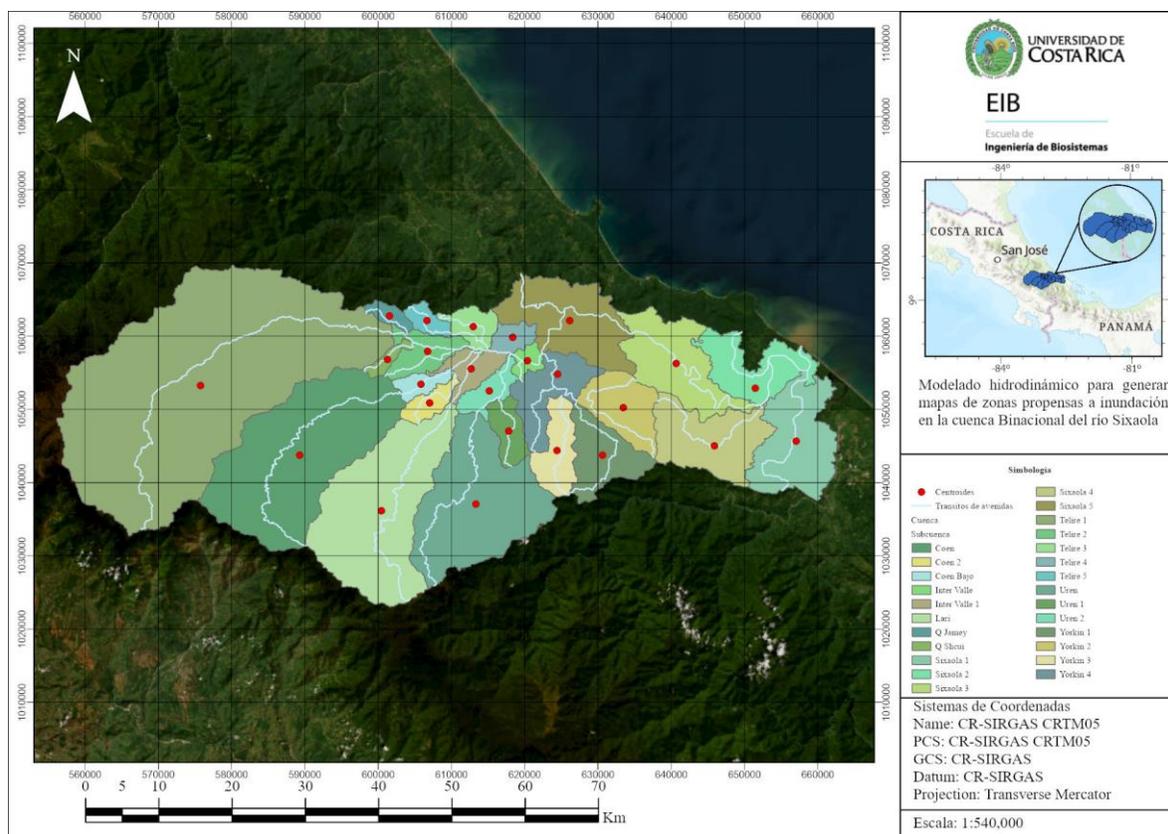


Figura 22. Ubicación de los centroides por subcuenca.

Tabla 9. Ubicación y asignación de datos de precipitación satelital para las subcuencas según sus centroides o estaciones de referencia.

Subcuenca	Longitud	Latitud	Precipitación satelital asignada
Telire 1	-83.3100	9.5249	Centroide Telire 1
Coen	-83.1868	9.4387	Centroide Telire 1
Lari	-83.0854	9.3694	Centroide Telire 1
Uren	-82.9683	9.3778	Centroide Yorkin 3
Telire 4	-82.9212	9.5830	Estación Gavilán Canta, Bratsi
Uren 2	-82.9514	9.5172	Estación Gavilán Canta, Bratsi
Uren 1	-82.9274	9.4676	Centroide Telire 1
Telire 2	-83.0276	9.5664	Estación Sepecue, Telire
Telire 3	-82.9708	9.5965	Estación Gavilán Canta, Bratsi
Yorkin 1	-82.8109	9.4370	Centroide Yorkin 1
Yorkin 3	-82.8668	9.4432	Centroide Yorkin 3
Yorkin 4	-82.8659	9.5375	Centroide Yorkin 4
Inter Valle	-82.9034	9.5542	Estación Gavilán Canta, Bratsi
Sixaola 2	-82.6207	9.5198	Estación Sixaola

Subcuenca	Longitud	Latitud	Precipitación satelital asignada
Sixaola 1	-82.5699	9.4536	Centroide Sixaola 1
Sixaola 3	-82.7185	9.5504	Centroide Sixaola 3
Sixaola 4	-82.6713	9.4488	Centroide Sixaola 4
Sixaola 5	-82.8511	9.6036	Centroide Sixaola 5
Q Shcui	-83.0774	9.5562	Estación Sepecue, Telire
Q Jamey	-83.0745	9.6105	Estación Sepecue, Telire
Yorkin 2	-82.7843	9.4958	Centroide Yorkin 2
Coen 2	-83.0253	9.5026	Estación Sepecue, Telire
Coen Bajo	-83.0359	9.5260	Estación Sepecue, Telire
Inter Valle 1	-82.9731	9.5442	Estación Gavilán Canta, Bratsi
Telire 5	-83.0280	9.6042	Estación Sepecue, Telire

En la Figura 23 se muestran los factores obtenidos a partir de la corrección por sesgo. La mayoría de estos factores corresponde a 1, lo cual significa que no fue necesario aplicar ninguna corrección. Por otra parte, los valores inferiores a 1 disminuyen los valores de precipitación, mientras que los valores superiores a 1 los aumentan. En los años 2007, 2010 y 2019 se tienen eventos extremos de gran relevancia en la zona de estudio, adicionales a los reportados en Barrantes Castillo 1995 y 2011, los cuales se detallan en la Tabla 10.

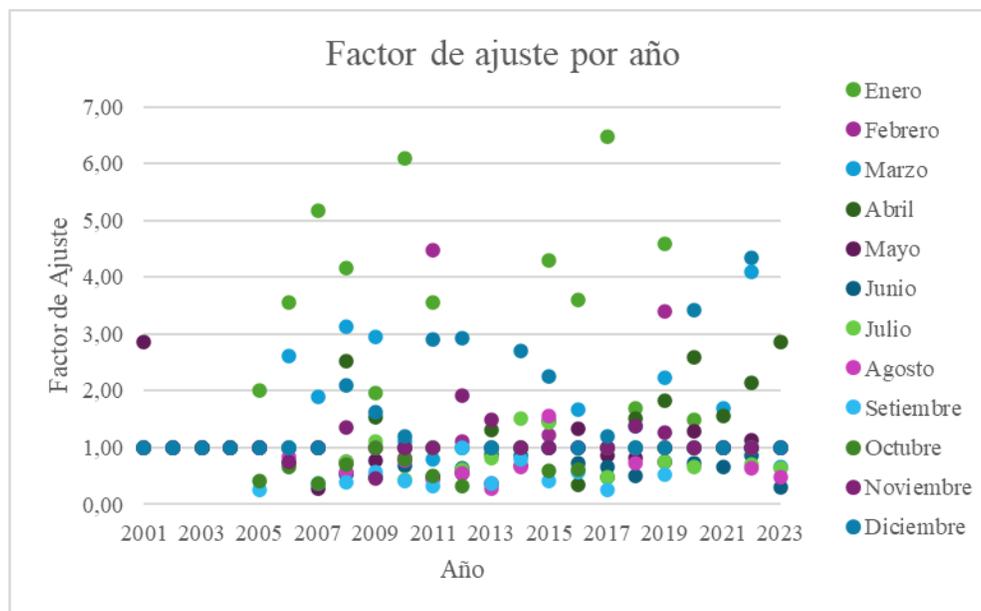


Figura 23. Factor de ajuste aplicado por año a los datos satelitales de precipitación PERSIANN-DIR Now.

Tabla 10. Eventos importantes transcurridos en el periodo de estudio (2001 – 2023).

Evento	Fecha	Descripción
Temporal en la Vertiente del Caribe y la Zona Norte	02 – 10 y 14 – 19 enero 2005	Inundaciones importantes en Sixaola. Fue el evento más fuerte de los últimos 35 años en la zona. Considerando ambos periodos, se registraron 3 eventos extremos (más de 80 mm por día), el mayor de ellos fue el día 8, de 345 mm, lo que equivale a poco más de la lluvia que se acumularía normalmente durante todo el mes (unos 300 mm).
Frente frío y Empuje frío	17 – 20 y 26 – 28 noviembre 2008	Fuertes inundaciones que generaron evacuaciones importantes en todo Sixaola. La lluvia más fuerte se registró el 25 de noviembre y alcanzó los 200 mm en una hora.
Empujes fríos	25 – 26 febrero 2010	El empuje frío #16 fue el más fuerte. En Sixaola se realizaron evacuaciones por las inundaciones, las cuales afectaron comunidades y plantaciones de banano.
Frentes fríos	Enero 2018	El Caribe fue la zona más lluviosa del país, se tuvieron inundaciones y deslizamientos.
Ciclón Tropical Elsa	Julio 2021	Evento extremo que afectó el Caribe y la Zona Norte. La lluvia acumulada durante el evento superó los 600 mm.

Fuente: IMN, 2024.

En la Tabla 11 y la Figura 24 se presentan como ejemplo los resultados de las IDF para duraciones de 60, 120, 180, 360, 720 y 1440 minutos para los periodos de retorno indicados aplicando la distribución de probabilidad de Valor Extremo I para el centroide de la subcuenca Sixaola 3 donde se localiza la estación del IMN de 87-13 Sixaola, siendo congruentes con los incrementos en las duraciones.

Al analizar los resultados de todos los centroides de las subcuencas solamente se aplicaron las siguientes LDF a las subcuencas: Telire 1, Yorkin 3, Yorkin 1, Sixaola 4, Sixaola 1, Yorkin 2, Sepecue Telire, Gavilán Canta Bratsi, Sixaola 3 y Sixaola 5 dependiendo de su ubicación y cercanía. En el anexo se pueden observar la LDF asignada a cada subcuenca, así como los datos correspondientes a cada una.

Tabla 11. Láminas de precipitación para diferentes periodos de retorno y duraciones, para la subcuenca Sixaola 3.

Duración (h)	Láminas de lluvia (mm)					
	T2	T5	T10	T25	T50	T100
1	42.16	60.59	72.80	88.22	99.66	111.02
2	61.30	84.45	99.78	119.15	133.52	147.78
3	73.83	102.31	121.17	145.00	162.68	180.23
6	92.06	126.64	149.53	178.46	199.92	221.23
12	109.80	150.09	176.77	210.48	235.49	260.31
24	137.59	188.81	222.71	265.56	297.34	328.89

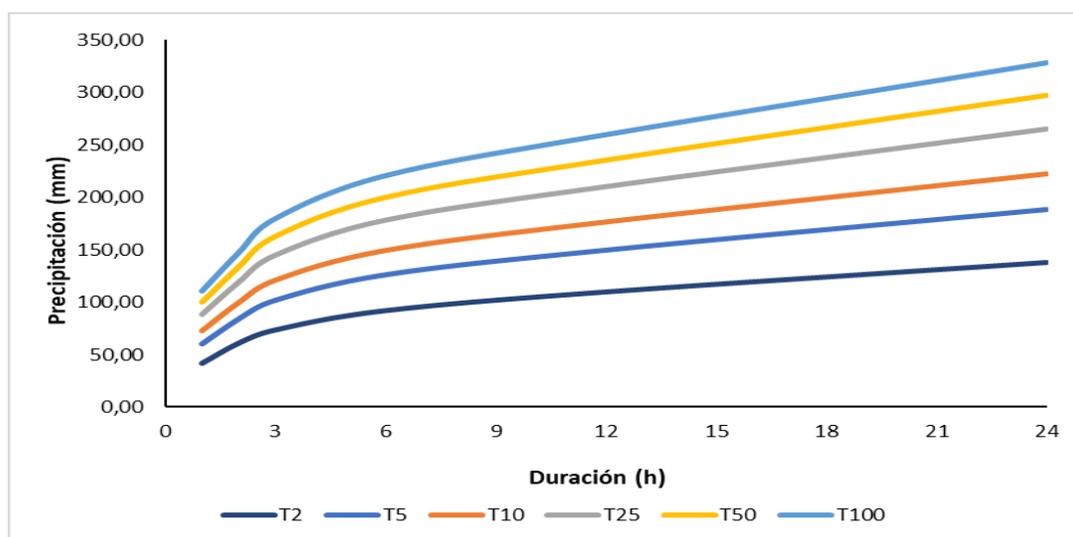


Figura 24. Curvas de lámina de precipitación, duración y frecuencia para la subcuenca Sixaola 3 del Río Sixaola de datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.

Tabla 12. Láminas de precipitación para diferentes periodos de retorno y duraciones, para la subcuenca Telire 1.

Duración (h)	Láminas de lluvia (mm)					
	T2	T5	T10	T25	T50	T100
1	49.50	72.92	88.43	108.03	122.57	137.00
2	67.12	100.03	121.82	149.35	169.77	190.04
3	78.18	117.77	143.98	177.10	201.68	226.07
6	99.41	143.54	172.76	209.68	237.07	264.26
12	117.06	160.35	189.02	225.23	252.10	278.76
24	139.58	185.77	216.35	255.00	283.66	312.12

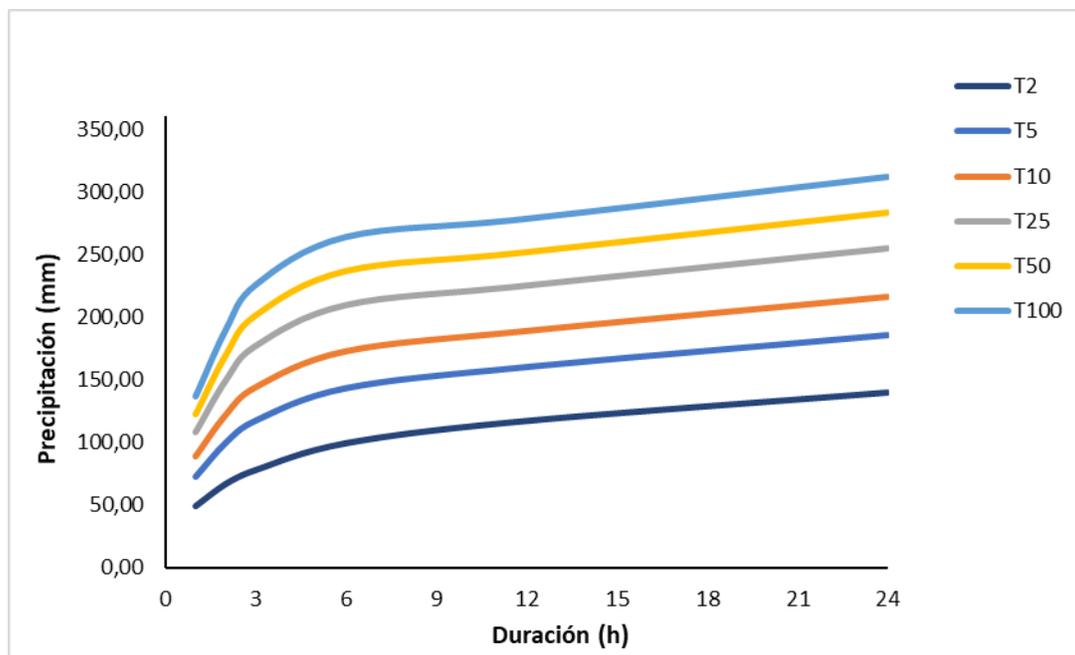


Figura 25. Curvas de lámina de precipitación, duración y frecuencia para la subcuenca Telire 1 del Río Sixaola de datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.

Factor de corrección de Área y distribución temporal de la lluvia

Es crucial adicionalmente definir cómo varía la lluvia en el espacio (subcuencas) y en el tiempo (duración del evento). Para eventos extremos, es posible utilizar **series temporales de precipitación** o escenarios sintéticos de tormentas. La distribución temporal de la lluvia se refiere a la forma en que la cantidad total de lluvia se distribuye dentro del tiempo de duración del evento. Usualmente la distribución temporal de la lluvia depende de factores meteorológicos inherentes en la formación de las nubes de lluvia y la cantidad de agua en estas, así como de otros factores meteorológicos, como la velocidad y dirección del viento. Aunque se han realizado varias investigaciones específicas para las condiciones climáticas de Costa Rica principalmente en el Valle Central, los estudios no son concluyentes como para recomendar procedimientos para desarrollar distribuciones temporales de lluvia que representen la realidad de Costa Rica con el propósito de diseñar o generar mapas de inundación. Para satisfacer esta necesidad, la práctica de la ingeniería en el desarrollo de análisis hidrológicos ha utilizado distribuciones temporales de lluvia empíricas desarrolladas en otros lugares. Un ejemplo es la distribución tipo II desarrollada por el NRCS, la cual se ha usado en aquellos casos en que el evento analizado tiene una duración de 24 horas. Para el análisis de eventos con duraciones diferentes a 24 horas, se ha aceptado el método de Bloques Alternos descrito en varias referencias clásicas de hidrología.

La distribución de lluvia por bloques alternos consiste en asignar la de lámina mayor valor en el intervalo utilizado en el centro de la tormenta e ir alternando las otras láminas hasta formar una distribución uniforme, según los cuartiles que se utilicen. En Puerto Rico por ejemplo los resultados del análisis de los cuartiles demostraron que la distribución tradicional con la lluvia concentrada en las horas centrales (cuartil 50%) de la duración del evento no puede ser sostenida por los registros históricos.

Para este caso se utilizó una distribución temporal de lluvia localizada en el cuartil 25, ya que, al comparar los resultados, es el cuartil que mejor se ajusta a los caudales históricos reportados en las estaciones hidrográficas de Bratsi y Sixaola que ya no se encuentran en operación desde el 2005.

Dado que la cuenca del Sixaola en total abarca cerca de 2916.62 km² y tiene cambios de elevación importantes en todo su curso, los efectos orográficos son muy importantes. Por ejemplo, en la parte alta de la cuenca el IMN reporta una precipitación promedio anual de 1500-2000 mm, en la cuenca media entre 3000 a 5000 mm y en la cuenca baja entre 2000 a 3000 mm. Además, la zona es influenciada por ondas tropicales y precipitaciones orográficas. Dado este panorama es casi improbable que las LDF puntuales generadas abarquen al mismo tiempo toda la cuenca. Generalmente, la LDF tiene un rango de aplicación de 10 km², cuando las áreas son mayores se aplican factores de reducción de área. Para el caso de Estados Unidos estas reducciones de área han sido desarrolladas para las cuencas de drenaje y están reportadas en el TP-41 y TP-49. Puerto Rico que tiene condiciones similares topográficas y es un país tropical desarrolló porcentajes de reducción en áreas de la región para aguaceros (HMR 51). Los porcentajes de reducción (Figura 26) son aplicados para las duraciones de la tormenta en la cuenca del río Sixaola dependiendo del área de cada subcuenca.

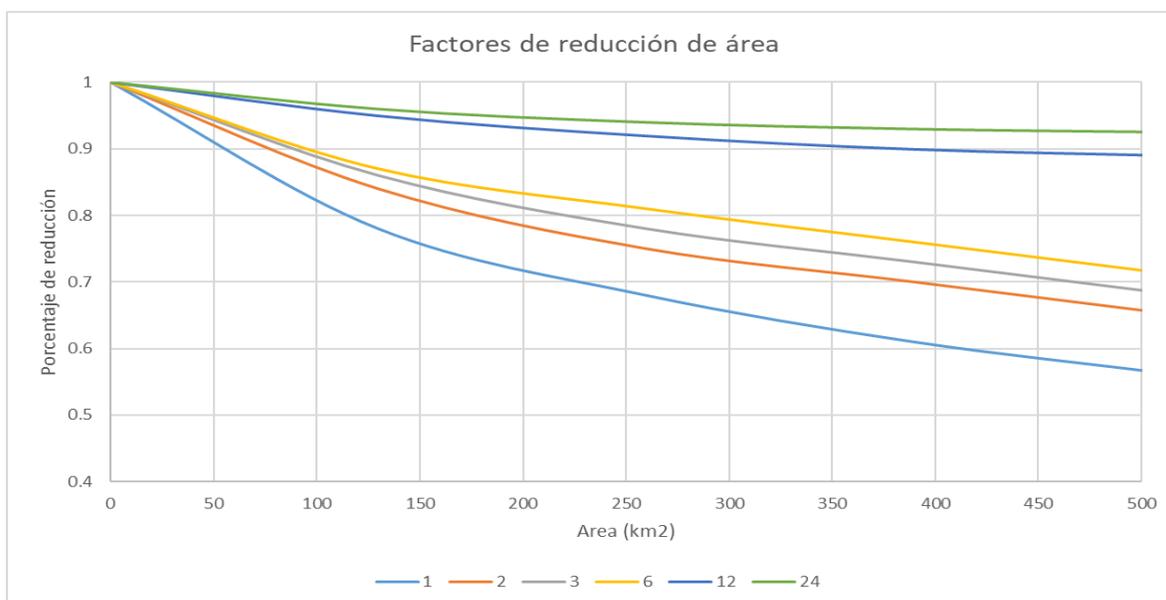


Figura 26. Factores de reducción de área según duraciones de la lluvia.

3.1.2 Escorrentía directa en HEC-MS

Para el cálculo de la escorrentía directa y las abstracciones hidrológicas (pérdidas) se pueden utilizar en HEC-HMS varios enfoques para modelar las pérdidas de agua por infiltración y evapotranspiración antes de que se genere la escorrentía. Los métodos más comunes son:

- Método del Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de suelos (SCS): Este método es ampliamente utilizado para eventos extremos debido a su capacidad para relacionar el tipo de suelo, el uso del suelo y la humedad inicial con las pérdidas por infiltración (TR-55).
- Método de infiltración de Green-Ampt: Simula las tasas de infiltración durante eventos de lluvia intensa y es útil en cuencas con suelos heterogéneos.

En este caso se va a utilizar el método del Número de Curva para la estimación de la escorrentía directa y las pérdidas por abstracciones iniciales.

El número de curva (CN por sus siglas en inglés) es un parámetro hidrológico que estima la escorrentía superficial luego de un evento de precipitación que engloba las condiciones de la superficie de la cuenca hidrográfica. Dicho método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (NRCS por sus siglas en inglés). Las condiciones de la superficie incluyen aquellas atribuibles a las condiciones y tipo de suelos, el uso del suelo o cobertura, y condiciones antecedentes de humedad (5 días previos al evento). El CN varía entre 0 y 100 donde el cero representa que el 100 por ciento de la lluvia se ha retenido en la cuenca y no produce escorrentía mientras que el 100 indica que prácticamente toda la lluvia se ha convertido en escorrentía.

A partir de los datos de suelos y sus características de infiltración los suelos se clasifican en suelos el grupo hidrológico A, B, C y D para diferentes conductividades hidráulicas que combinándolos con la cobertura según la Tabla 13 es posible asignar el valor de CN para la condición antecedente de humedad del suelo II, donde se la saturación del suelo es generada con acumulados de lluvia previos entre 25mm a 52 mm de lámina.

Para realizar la asignación de manera espacial se intersecan las capas de cobertura y suelos clasificados generándose un mapa de CN's que serán ponderados para cada una de las cuencas usando el software ARCGIS PRO. En la Tabla 14, Tabla 15 y la Figura 27 se presenta la distribución de los CN II ponderados para cada una de las subcuencas analizadas.

Las condiciones de humedad inicial del suelo es un parámetro importante de determinar ya que los CN de las tablas suponen una condición de humedad II con un acumulado de lluvia antecedente en los 5 días previos entre 25.4 mm a 51 mm. La cantidad de agua en el suelo al inicio del evento es crítica, ya que puede influir en la cantidad de infiltración y, por lo tanto, en la escorrentía. En eventos extremos, se debe suponer que los

suelos ya están saturados si las lluvias han sido continuas o si se trata de un evento de alta magnitud, por lo que se pueden incluir simulaciones con la condición antecedente de humedad III, generando mayores caudales.

Tabla 13. Números de curva de escorrentía (CN II) de acuerdo con el tipo de uso de suelo.

Tipos de cobertura	CN			
	A	B	C	D
Agua	98	98	98	98
Banano en barbecho (renovación o abandonado)	61	70	77	80
Bosque	30	30	41	48
Bosque con claros (ralo)	35	48	57	63
Bosque de tierras bajas (anegadas)	32	35	45	53
Bosque mezclado con palma	32	57	71	78
Cultivo de banano intensivo	65	73	79	81
Cultivos mixtos (plátano, pastos, etc)	66	74	80	82
Páramo	30	35	47	55
Pasto con arboles	35	56	70	77
Pasturas	39	61	74	80
Playón de ríos	72	82	87	89
Rural	51	68	79	84
Urbano/Suelo desnudo	77	85	90	92

Tabla 14. Número de curva, área y porcentaje de grupo hidrológico por cuenca.

Cuenca	Grupo Hidrológico (%)				Área (km ²)	CN Ponderado
	A	B	C	D		
Inter Valle	4.94	26.24	68.81	0.00	35 36.59	64.86
Río Coen	0.00	1.01	54.77	44.21	41 522.81	44.27
Río Lari	0.00	81.77	18.23	0.00	30 612.11	32.02
Río Sixaola	13.97	5.48	8.94	71.61	65 638.11	63.24
Río Telire	1.59	1.15	23.62	73.64	102 028.50	47.46
Río Uren	1.40	97.34	1.26	0.00	32 791.59	31.68
Río Yorkin	10.91	52.15	6.38	30.56	29 318.14	36.94

Tabla 15. Número de curva y área por Subcuenca.

Cuenca	SubCuencas	Área (km2)	CN
Inter Valle	Inter Valle 1	35.37	64.86
Río Coen	Coen	372.21	44.48
Río Coen	Coen 2	23.78	39.43
Río Coen	Coen Bajo	19.24	46.23
Río Lari	Lari	306.12	32.02
Río Sixaola	Sixaola 1	142.57	73.34
Río Sixaola	Sixaola 2	91.53	71.10
Río Sixaola	Sixaola 3	132.87	69.38
Río Sixaola	Sixaola 4	129.37	57.37
Río Sixaola	Sixaola 5	145.43	50.18
Río Sixaola	Inter Valle	14.60	41.67
Río Telire	Q Jamey	13.87	41.00
Río Telire	Q Schui	11.75	43.97
Río Telire	Telire 1	881.66	47.17/ 44*
Río Telire	Telire 2	44.82	55.71
Río Telire	Telire 3	30.44	51.31
Río Telire	Telire 4	20.44	41.66
Río Telire	Telire 5	17.30	48.28
Río Uren	Uren	262.46	30.17
Río Uren	Uren 1	35.14	30.83
Río Uren	Uren 2	30.32	45.71
Río Yorkin	Yorkin 1	80.17	38.56
Río Yorkin	Yorkin 2	78.34	42.53
Río Yorkin	Yorkin 3	56.45	30.58
Río Yorkin	Yorkin 4	78.22	34.26

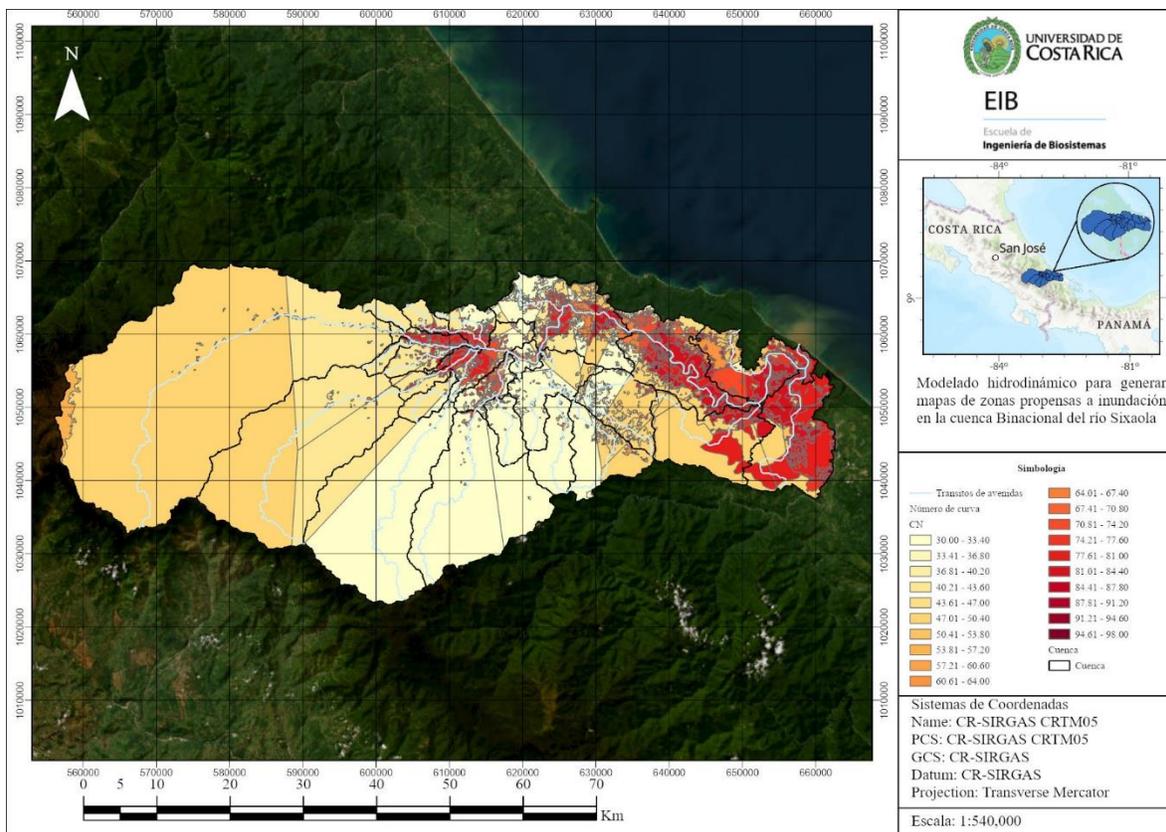


Figura 27. Mapa de los CN ponderados para la cuenca del Río Sixaola.

3.1.3 Transformación precipitación-escorrentía a hidrograma

Una vez que se ha calculado la lluvia excedente (escorrentía directa) y las abstracciones iniciales, el siguiente paso es transformar esa precipitación en un hidrograma de salida de cada una de las subcuencas.

El método del hidrograma unitario del NRCS es comúnmente utilizado para transformar la lluvia de exceso en un caudal. Es ideal para eventos extremos de corta duración (menos de 24 horas al no contar con hidrogramas unitarios de la cuenca del Sixaola). Posteriormente se realiza una convolución lineal para sumar los caudales generados cuando se unen diferentes subcuencas. Para este proceso se estiman los tiempos de concentración y el tiempo retardo de cada de las subcuencas.

El tiempo de concentración corresponde a la suma de los tiempos de viaje en segmentos consecutivos. Tomando las distancias desde la zona más alejada de la cuenca hasta la salida de esta. Este tiempo se obtuvo mediante el método de velocidad y método de retardo del TR-55 (Technical Release 55: "Urban Hydrology for Small Watersheds") de la NRCS (1986). El método de velocidad incluye el cálculo del tiempo de viaje de una partícula de agua dentro de la cuenca. El tiempo de viaje se calcula para tres tipos de regímenes de flujo

diferentes, esto es, flujo como lámina sobre la superficie, flujo concentrado de poca profundidad, y flujo en canal abierto. Cada uno de estos regímenes cuenta con su propia técnica para determinar el tiempo de viaje y sus propias limitaciones.

El método utiliza la vía de drenaje más largo o largo hidráulico (“Longest flow path”) por la que una partícula de agua viaja desde el punto más lejano de la cuenca, hidráulicamente hablando, hasta llegar al punto de interés de cada subcuenca. Para su obtención se utilizó el software ArcGisPro y la extensión ArcHydro Tools. Luego se prosigue a la clasificación del largo hidráulico y se divide en tres tramos de acuerdo con la bibliografía, los cuales son: flujo laminar, flujo concentrado de poca profundidad y en canales abiertos. Para cada tramo se obtuvieron las longitudes de los tramos, las elevaciones de cada punto aguas arriba y abajo a partir del modelo de elevación digital, las pendientes y características de rugosidad y forma.

$$T_c = T_1 + T_2 + T_3 + T_i \quad \text{Ec. 8}$$

La longitud hidráulica se categoriza en tres tramos de acuerdo con la bibliografía. En el flujo laminar se inicia el movimiento del agua y generalmente se da en los primeros 90 m (utilizando una intensidad de lluvia de 93.5 mm/h), sin embargo, en este caso debido a las grandes extensiones de las subcuencas y altas pendientes no se genera un aporte significativo al tiempo de concentración, sin embargo, para efectos de la modelación hidrológica se consideró un 10% adicional en el tiempo de retardo para cada subcuenca.

El Flujo concentrado, el cual abarca después de los primeros 90 m hasta la intersección con algún cauce de cada subcuenca y en este caso se da por medio de sitios no pavimentados.

Por último, está el Flujo en Canales, el cual responde a la ecuación de Manning para flujo normal, considerándose una sección transversal trapezoidal en función del espejo de agua promedio (que se pudo obtener aguas arriba, medio y abajo con las ortofotos), y un talud del canal con pendiente $z = 1:0.5$. También se varió el tirante de 3 a 105 entre subcuencas de acuerdo con las dimensiones de cada canal. Se utilizó 0.045 como coeficiente de rugosidad de Manning que corresponde a canales de tierra con algunas malezas y pasto.

Una vez calculados los tiempos en cada tramo, estos se suman y da como resultado el tiempo de concentración. Posteriormente, se calcula el tiempo de retardo que se considera 0,6 del tiempo de concentración. Los resultados de los tiempos se muestran en la Tabla 16

Tabla 16. Tiempos de concentración y retardo para cada subcuenca

Subcuenca	Tiempo de concentración (min)	Tiempo de retardo (min)	Tiempo de retardo +10% (m)
Telire 1	164.93	98.96	102
Telire 2	39.99	23.99	26
Telire 3	68.36	41.02	45
Telire 4	41.28	24.77	27
Telire 5	76.20	45.72	50
Uren	75.19	45.11	50
Uren 1	34.83	20.90	23
Uren 2	63.61	38.17	42
Coen	121.44	72.86	80
Coen 2	49.64	29.78	33
Coen bajo	25.42	15.25	17
Lari	93.58	56.15	62
Yorkin 1	71.42	42.85	47
Yorkin 2	136.31	81.78	90
Yorkin 3	43.68	26.21	29
Yorkin 4	65.05	39.03	43
Q Shcui	34.29	20.57	23
Q Jamey	39.42	23.65	26
Inter Valle	92.78	55.67	61
Inter Valle 1	43.35	26.01	29
Sixaola 1	197.79	118.67	No se considera el 10% adicional
Sixaola 2	114.39	68.63	No se considera el 10% adicional
Sixaola 3	266.65	159.99	No se considera el 10% adicional
Sixaola 4	114.53	68.72	No se considera el 10% adicional
Sixaola 5	84.29	50.58	No se considera el 10% adicional

3.1.4 Flujo base

El flujo base es el caudal que ya está presente en el sistema antes de la llegada del evento extremo. En eventos extremos, el flujo base puede no ser un factor dominante, pero es importante considerarlo para obtener resultados más precisos o tratar de modelar añadiendo diferentes escenarios de flujo base principalmente en época lluviosa. Estos caudales no fueron simulados en HEC-HMS, pero serán incorporados en modelo hidráulico como caudal natural promedio anual, el cual se explicará en la sección correspondiente.

3.1.5 Tránsito de avenidas o rastreo hidráulico:

La escorrentía generada en las subcuencas debe ser "enrutada" o transitada a través de los ríos o canales de la cuenca hasta los puntos de salida. Para su aplicación existen varios métodos como:

- Método de Muskingum: Utilizado para la propagación del caudal a lo largo de los canales fluviales, tiene en cuenta los efectos de almacenamiento y retardo del agua en el río.
- Método Muskingum-Cunge: Similar al anterior, pero incorpora los principios hidráulicos para mejorar la precisión, especialmente en eventos extremos.
- Método de la onda cinemática: Simula de manera simplificada el flujo en canales con pendientes pronunciadas y cuando los efectos de almacenamiento son pequeños.

En este estudio se estará aplicando el método de Muskingum-Cunge. El método de enrutamiento Muskingum-Cunge se basa en los conceptos del método Muskingum descrito en la literatura (Chow, 1959). Este método utiliza una combinación de la ecuación de continuidad y una forma simplificada de la ecuación de momento. El método Muskingum-Cunge a veces se denomina método de "coeficiente variable", ya que los parámetros de enrutamiento se recalculan en cada paso de tiempo en función de las propiedades del canal y la profundidad del flujo.

El método utiliza los términos de la aceleración convectiva y local donde la Ec. 9 es combinada con la Ec. 10 dando como resultado la Ec.11 donde c es la celeridad de la onda de flujo, u es la difusividad hidráulica y q_L es la entrada de flujo lateral. Posteriormente, HEC-HMS resuelve la ecuación recursivamente usando el método de Muskingum y usando una aproximación de diferencias finitas de las derivadas parciales y como se describe en el Manual de Referencia de HEC-HMS (2024) se aplica el mejoramiento dado por Cunge (1969) donde evalúa la difusión numérica que es generada por Muskingum y la iguala a la difusión física representada en la Ec. 11.

$$S_f = S_o - \partial y / \partial x \quad \text{Ec. 9}$$

$$\partial A / \partial t + \partial Q / \partial x = q_L \quad \text{Ec. 10}$$

$$\partial Q / \partial t + c \partial Q / \partial x = \mu \partial^2 Q / \partial x^2 + c q_L \quad \text{Ec. 11}$$

$$c = dQ / dA \quad \text{Ec. 12}$$

$$\mu = \frac{q}{2BS_o} \quad \text{Ec. 13}$$

Los parámetros que se requieren para utilizar este método dentro de HEC-HMS son la condición inicial: el flujo de salida es igual al flujo de entrada, la longitud del tránsito [m], la pendiente de fricción [m/m], el coeficiente de rugosidad n de Manning, un método y valor de intervalo de espacio-tiempo, un método y valor de índice, y una sección transversal representativa. Si no se dispone de información para estimar la pendiente de fricción, se puede utilizar la pendiente del lecho como aproximación.

La elección de los pasos de espacio y tiempo (Δx y Δt) es fundamental para garantizar la precisión y la estabilidad. En HEC-HMS se utilizó el DX Automático DT Especificado. Cuando se selecciona el método DX Auto DT especificado, se utilizará el número especificado de tramos de canal mientras varía automáticamente el intervalo de tiempo para tomar el mayor intervalo de tiempo posible mientras se mantiene la estabilidad numérica.

El método de índice de flujo se utiliza junto con las propiedades físicas del canal y la selección de intervalos Δt y Δx mencionada anteriormente para discretizar el alcance del enrutamiento tanto en el espacio como en el tiempo. Los caudales de referencia apropiados y las celeridades de las ondas de inundación dependen de las propiedades físicas del canal, así como de los eventos de inundación en cuestión. La experiencia ha demostrado que un caudal de referencia (o celeridad) basado en los valores medios del hidrograma (es decir, a medio camino entre el caudal base y el caudal máximo) es, en general, la opción más adecuada. Los caudales de referencia (o celeridades) basados en valores máximos de caudal tienden a acelerar numéricamente la onda de inundación más de lo que ocurriría en la naturaleza, mientras que lo contrario es cierto si se utiliza un caudal de referencia (o celeridad) bajo (HEC-HMS, 2024).

Las secciones transversales usadas en este análisis son generales basadas en una forma trapezoidal dependiendo del ancho de cada canal, medido a partir de imágenes satelitales con pendiente de talud de 1:0.5. En la Tabla 17 se presentan los datos ingresados en el modelo hidrológico correspondientes a los tránsitos de avenida y en la Figura 28 se muestran cómo se distribuyen el tránsito de avenida por subcuenca.

Tabla 17. Tránsitos de avenida.

Tránsito	Longitud (m)	Altura inicial (m)	Final inicial (m)	Pendiente (m)	Ancho de canal (m)	n de Manning
TA Telire 2	13050.86	166	64	0.0078	10	0.045
TA Telire 3	3175.66	64	53	0.0035	64.11	0.045
TA Telire 5	7463.21	87	53	0.0046	11.87	0.045
TA Uren 2-2	4324.2	111	79	0.0074	15.21	0.045
TA Uren 2-1	7618.08	79	48	0.0041	28.28	0.045
TA Coen Bajo	9034.54	197	90	0.0118	28.07	0.045
TA Yorkin 4	12816.38	86	43	0.0034	29.03	0.045
LFP-TA InterValle 1	8746.96	138	57	0.0093	33.3066	0.045

Tránsito	Longitud (m)	Altura inicial (m)	Final inicial (m)	Pendiente (m)	Ancho de canal (m)	n de Manning
TA InterValle 1	5579.28	90	57	0.0059	33.03	0.045
TA InterValle2	3796.77	53	48	0.0013	65.22	0.045
TA InterValle	6070.76	48	43	0.0008	80.7466	0.045
TA-Sixaola 2	18412.2	5	2	0.0002	109.855	0.045
LFP- TA Sixaola 3	33028.54	19	5	0.0004	108.33	0.045
TA-Sixaola 5	20345.63	43	19	0.001	86.6317	0.045

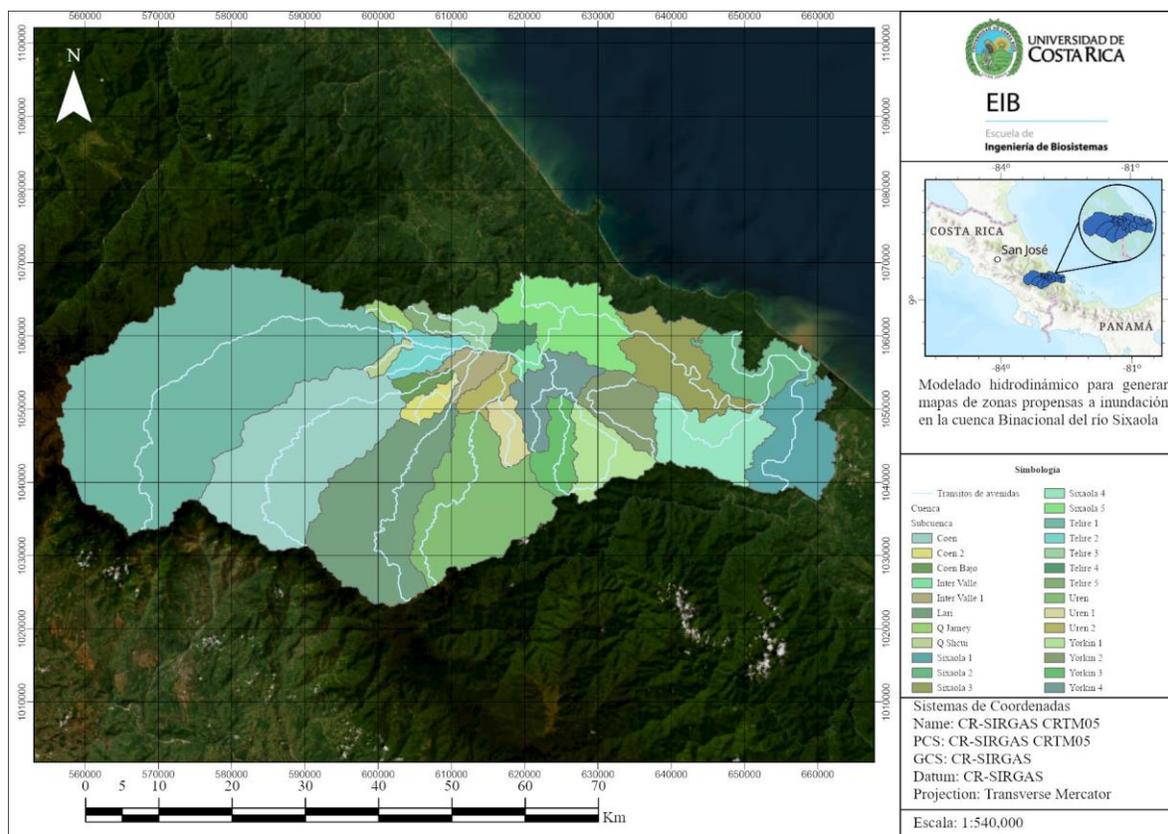


Figura 28. Tránsito de avenidas por subcuenca.

3.2 Simulación Hidrológica

Para la simulación hidrológica se desarrollan tres componentes fundamentales, el modelo de cuenca, modelo meteorológico y el control de especificaciones. Para el componente de cuenca se desarrolla según el esquema de la

Figura 29. Se cuenta con un total de 25 subcuencas, donde cada una presenta los valores de CN ponderado para la valoración de las pérdidas y el cálculo de la precipitación directa o de exceso. Así mismo la transformación de la precipitación de exceso en caudal se realiza mediante el método de hidrograma unitario del SCS mencionado en la sección correspondiente con los tiempos de retardo. Además, el modelo se compone de 14 tránsitos de avenida que utiliza el método de Muskingum-Cunge y el uso de 18 uniones para ir trasegando el caudal por los diferentes sitios y unirlos para así poder llegar hasta la salida del Sixaola.

El área total simulada es de 3059,2 km², se cuenta con dos planicies de inundación, la primera va desde la salida de la subcuenca Telire 1 hasta Unión-InterValle-Uren, cercano a la población de Suretka, aguas arriba de esta unión confluyen los ríos Telire, Coen y Urén, así como las Quebradas Jamey y Shcui. Posteriormente, de esta planicie el agua se encañona en el tránsito de avenidas TA-InterValle en una longitud de aproximadamente 6070 m hasta la confluencia del río Yorkin en la Unión-Inter-Yorkin, cercana a la población de Boca de Yorkin. En este punto inicia nuevamente la segunda planicie del Río Sixaola hasta la confluencia al mar, pasando por las subcuencas denominadas Sixaola 5, Sixaola 3, aportando en la confluencia Unión-Sixaola 3, la subcuenca Sixaola 4, la cual es transitada por TA-Sixaola2, ubicada en el puente Internacional Sixaola-Guabito, carretera nacional 36. Las poblaciones cercanas son Sixaola. Finca 52 y Guabito. Aguas abajo aporta la subcuenca Sixaola 2 pero de forma indirecta.

Cabe destacar que las áreas de aporte directas al Sixaola son de aproximadamente 2916.62 km² hasta la desembocadura y la subcuenca denominada Sixaola 1 (142.54 km²) localizada en el territorio de Panamá aporta de forma indirecta a la planicie de inundación cuando se generan escorrentías que generan la inundación agravando la situación en la parte baja.

3.2.1 Resultados del análisis hidrológico

Análisis probabilístico de caudales históricos

Al realizar la consulta y análisis de los datos históricos de las estaciones hidrológicas del ICE que se encontraban localizadas en Bratsi y Sixaola se indica que el caudal instantáneo máximo registrado se dio el 11 y 12 de agosto de 1991 con 3520 m³/s y 4090 m³/s para Bratsi y Sixaola respectivamente. Posteriormente en Barrantes, 1992 los mismos fueron actualizados a 3810 m³/s y 4200 m³/s, respectivamente.

Se realiza un análisis de probabilidad a los datos reportados en la Tabla 18. Caudales instantáneos históricos para encontrar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno y se encuentra que la mejor distribución que ajusta a los datos observados es Log Pearson III con producto de momentos ya que al aplicarse la prueba estadística de Kolmodorov-Smirnov se obtiene 0.085 para Bratsi y 0.152 para Sixaola, aceptándose la hipótesis nula en ambos casos. Adicionalmente, se calculan las bandas de confianza para 5% y 95%. Para las posiciones de ploteo se aplicó Blom. En la Figura 30 se observan los caudales para los diferentes periodos de retorno.

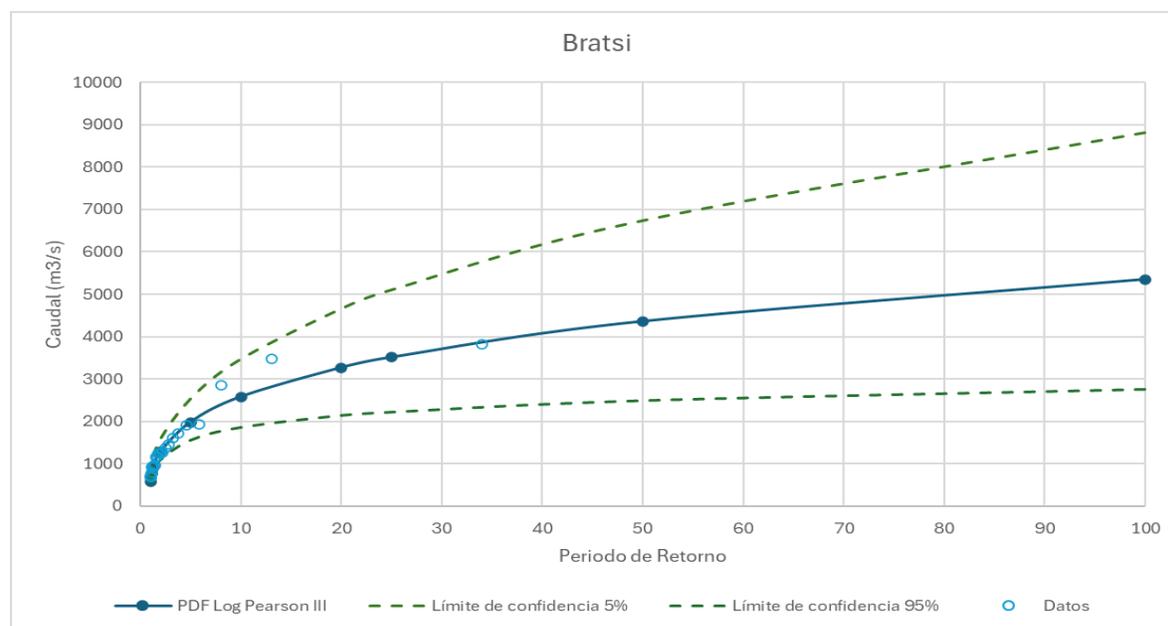
Tabla 18. Caudales instantáneos históricos.

Caudales	Bratsi	Sixaola
1972	1930	2590
1973	1370	2300
1974	1460	2200
1975	2860	3610
1976	1260	2390
1977	931	1130
1978	1610	1790
1979	676	980
1980	1900	2260
1981	957	1460
1982	1240	1970
1983	789	1481
1984	1710	2090
1985	1170	2050
1986	1250	1850
1987	3480	3400
1988	727	837
1989	919	1990
1990	954	1880
1991	3810 ⁴	4200 ⁴
1992	1160	1890

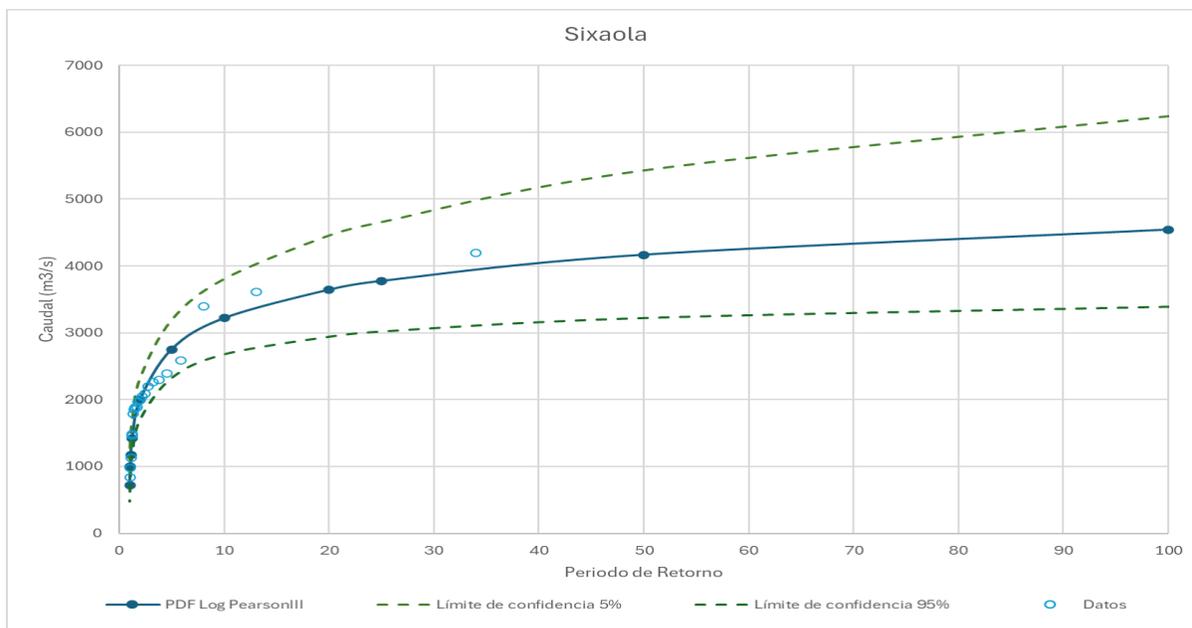
⁴ Caudal corregido según Barrantes, 1996.

Tabla 19. Caudales máximos para diferentes periodos de retorno con los límites de confianza según análisis probabilístico.

Periodo de retorno	Bratsi			Sixaola		
	Caudales (m ³ /s)					
	Probabilidad	Límite de confianza 5%	Límite de confianza 95%	Probabilidad	Límite de confianza 5%	Límite de confianza 95%
100	5346.0	8805.9	2758.4	4543.3	6236.3	3390.3
50	4355.9	6731.8	2491.9	4167.4	5426.5	3221.3
25	3509.3	5100	2220	3775.5	4655	3020
10	2576.8	3466.5	1859.1	3218.6	3803.4	2677.4
5	1979.5	2532.9	1557.4	2752.3	3190.5	2323.9
2	1279.7	1581.2	1091.5	2001.3	2322.6	1703.2
1.25	899.8	1089.2	778.9	1417.8	1707.2	1186.5



(a)



(b)

Figura 30. Análisis de probabilidad de los caudales históricos.

Simulación Hidrológica

Los resultados presentados de la simulación hidrológica incluyen los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años para las diferentes subcuencas, tránsitos y uniones los cuales se presentan a continuación. Es importante mencionar que al realizar la simulación hidrológica se da una atenuación importante en los caudales cuando se transita por la parte baja de la cuenca por la disminución de la pendiente, el largo del tránsito de avenidas, la planicie de inundación y la dimensión del canal, especialmente en TA-Sixaola 3. Esto resalta la importancia de realizar la simulación hidrológica donde al generarse una tormenta que cubra toda la cuenca, las subcuencas aportan su caudal en diferentes tiempos dependiendo de su localización y tiempos de concentración, adelantándose o retrasado la suma de los picos del hidrograma final. Además, al transitar los hidrogramas por diferentes tramos de la cuenca los mismos sufren atenuación de los máximos y desplazamiento en tiempo, suavizando la llegada de la avenida al puente de Binacional del Río Sixaola.

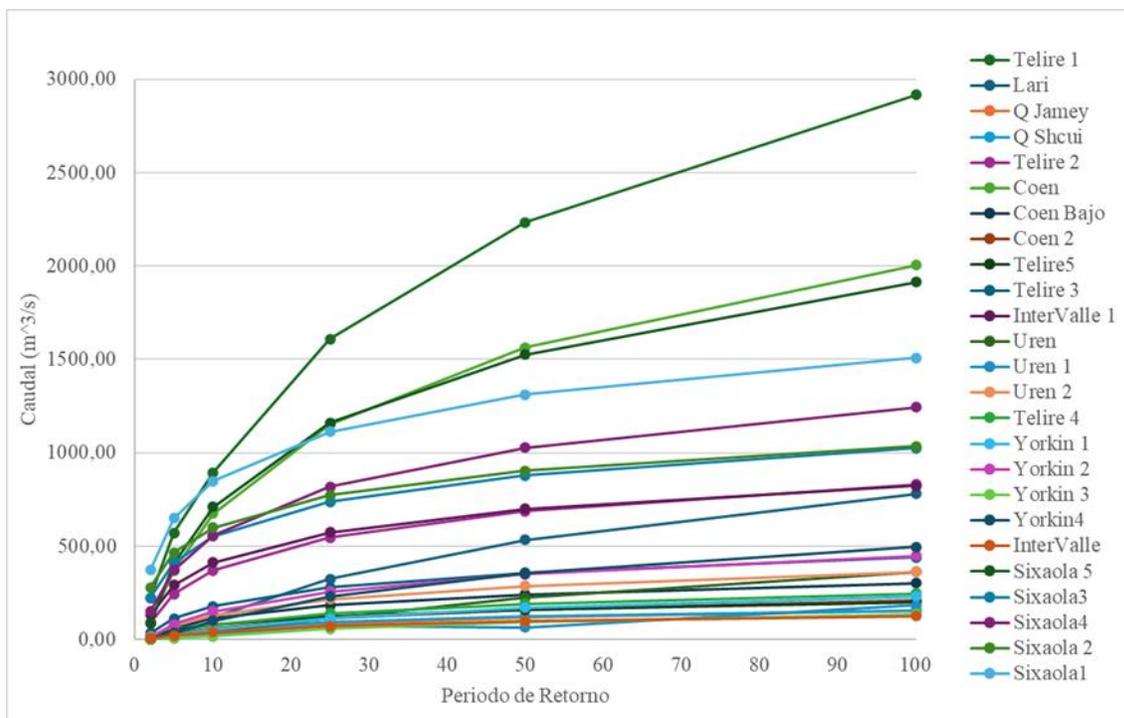


Figura 31. Caudales máximos simulados para diferentes periodos de retorno en las subcuencas que conforman la cuenca del Río Sixaola.

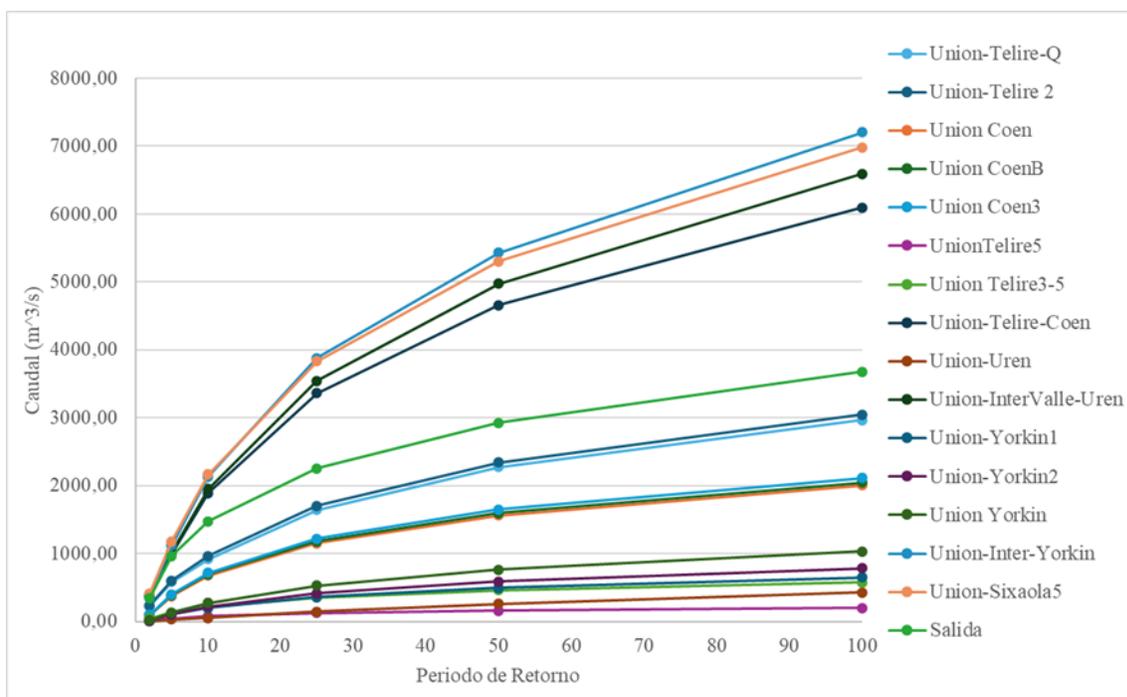


Figura 32. Caudales máximos simulados para diferentes periodos de retorno en las uniones de las subcuencas que conforman la cuenca del Río Sixaola.

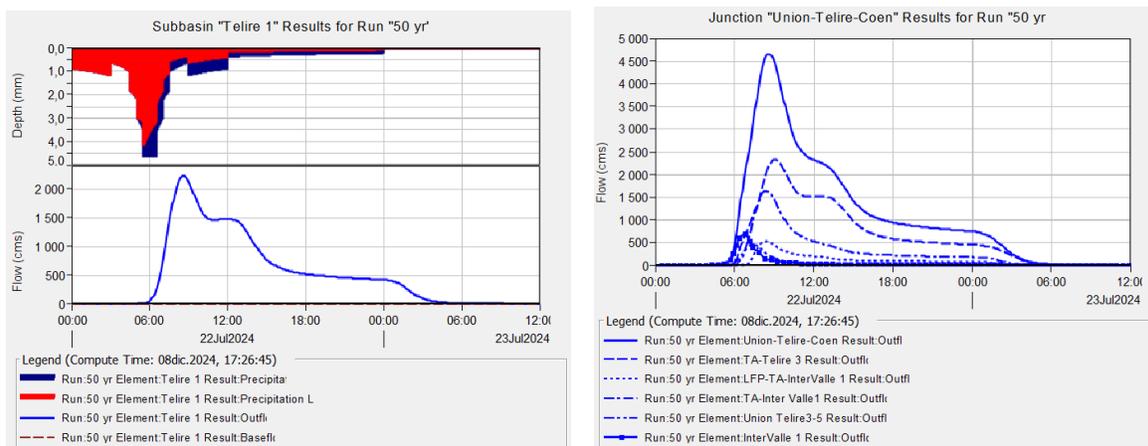


Figura 33. Distribución de excedencias y caudales en subcuenca Telire 1 y unión Telire-Coen para 50 años de periodo de retorno.

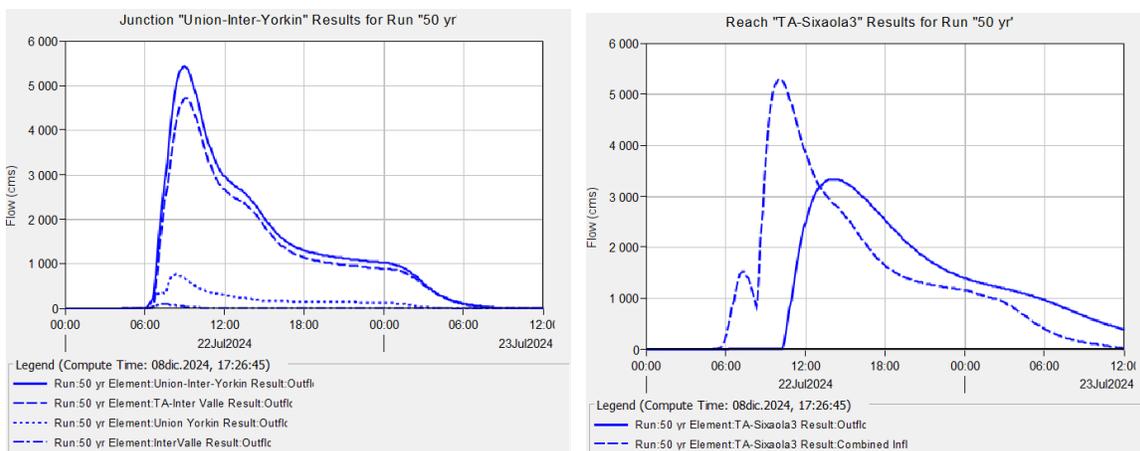


Figura 34. Caudales simulados en la Unión Inter-Yorkin y el tránsito TA-Sixaola3.

4 Análisis Hidráulico

Los modelos hidráulicos en dos dimensiones (como HEC-RAS2D) permiten simular como el agua se moverá dentro de una cuenca o red fluvial, tomando en cuenta la topografía y la infraestructura existente. Estos modelos ayudan a generar mapas de inundación que muestran la extensión, velocidad y profundidad de las inundaciones en diferentes escenarios.

Su utilidad radica en la posibilidad de evaluar diferentes intervenciones físicas (medidas estructurales) diseñadas para reducir el impacto de las inundaciones, como la construcción de diques, presas, sistemas de drenaje pluvial mejorados, canales de desviación, y áreas de

retención de aguas. Adicionalmente, son importantes para la planificación y desarrollo de medidas no estructurales que beneficien o mitigue el impacto. Entre algunas se pueden mencionar:

- Planes de uso del suelo: Regular el desarrollo en zonas propensas a inundaciones mediante restricciones o requisitos específicos para nuevas construcciones.
- Sistemas de alerta temprana: Implementar estaciones meteorológicas y sensores de caudal para monitorear en tiempo real el nivel de los ríos y las condiciones meteorológicas, permitiendo alertar a las autoridades y a la población ante la inminencia de una inundación.
- Educación y concientización pública: Programas para aumentar la conciencia en la población sobre los riesgos de inundaciones, acciones preventivas y respuesta adecuada ante emergencias.

El modelo de flujo bidimensional se utiliza con un esquema de resolución numérica, como el método de volúmenes finitos, para calcular la dirección y magnitud del flujo en celdas de una malla que cubre el área de estudio. Para la simulación de eventos extremos, se modelan diferentes escenarios de lluvias intensas como los planteados en el análisis hidrológico.

4.1 Geometría del terreno

El modelo requiere datos topográficos detallados, como MDE (Modelos Digitales de Elevación), para definir el área de estudio. La calidad en los resultados del modelo va a depender de los insumos disponibles para la modelación. Lo ideal es contar con secciones transversales detalladas cada 50 o 100 metros dependiendo de los cambios en la geometría o información de Lidar con resolución de 0.5 metros.

En este estudio no se cuenta con esta información detallada del terreno por lo que fue necesario utilizar el modelo de elevación digital (MED) de JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), el cual es un modelo digital de elevación global generado por el satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite) a través del radar PALSAR (Phased Array tipo banda L de Radar de Apertura Sintética) (*Japan Aerospace Exploration Agency [JAXA], 2016*). Este DEM tiene una resolución de aproximadamente 30 metros para Costa Rica y cubre la totalidad de la superficie terrestre de la cuenca, lo que lo convierte en una herramienta clave para la modelación hidráulica 2D. Es ideal para estudios de drenaje y respuesta hidrológica e hidráulica y es útil en áreas montañosas o con topografía compleja. Sin embargo, este MED no va a contar con la resolución necesaria para detallar las áreas de inundación en zonas donde no exista diferencias topográficas significativas, alterando el curso del agua y no siendo tan preciso.

La batimetría con una resolución de 1 metro es incorporada al modelo para dar una mayor resolución del cauce ayor del río Sixaola. En este caso se cuenta con información desde la desembocadura del Sixaola hasta la confluencia del río Telire con el Yorkin en la Unión InterValle-Yorkin. Aguas arriba de esta confluencia no se tiene una definición de la topografía del cauce por lo que los resultados en esta sección (Entrada del Río Telire hasta InterValle-Yorkin, pueden no reflejar las zonas inundables de una forma fiable ya que depende solamente de la definición topográfica del producto MED de Jaxa.

Se realiza una definición del área de estudio para la modelación hidrológica la cual tiene un área de 486,33 km² e incorpora la planicie aguas arriba de Bratsi (menor precisión dado el MED) y la planicie del Sixaola (mejor definición del cauce mayor), adicionalmente se incluye la parte baja del territorio de Panamá para analizar la interacción con la planicie inundable.

En la Figura 36 se puede observar el detalle de la topografía y la incorporación de la batimetría al modelo en el RAS-MAPPER de HEC-RAS.

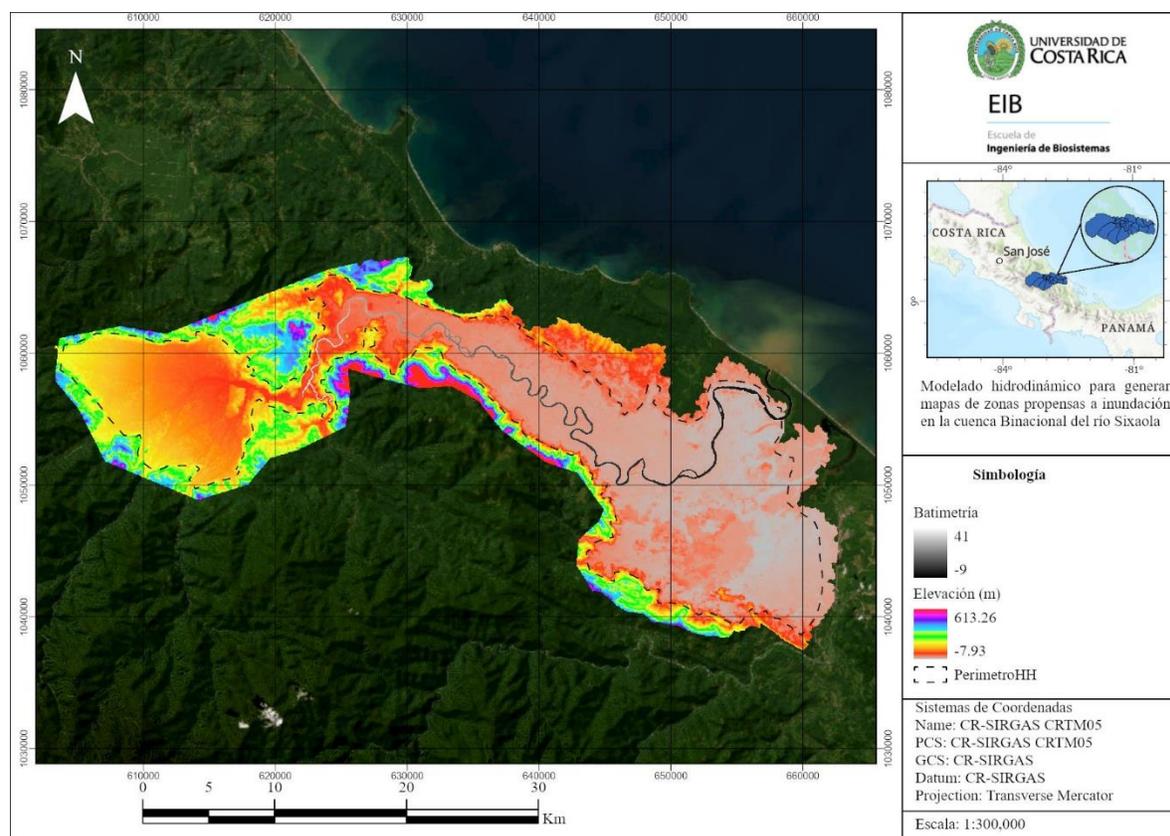


Figura 35. Área de trabajo de la modelación hidráulica.

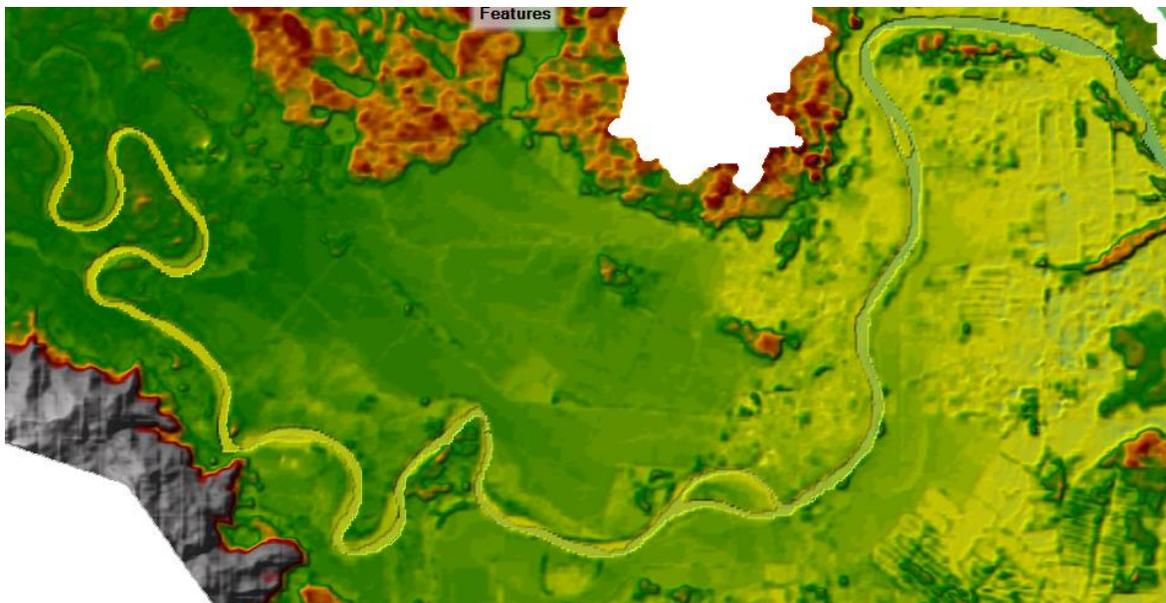


Figura 36. Detalle de la combinación del MED y la batimetría del río en HEC-RAS Mapper.

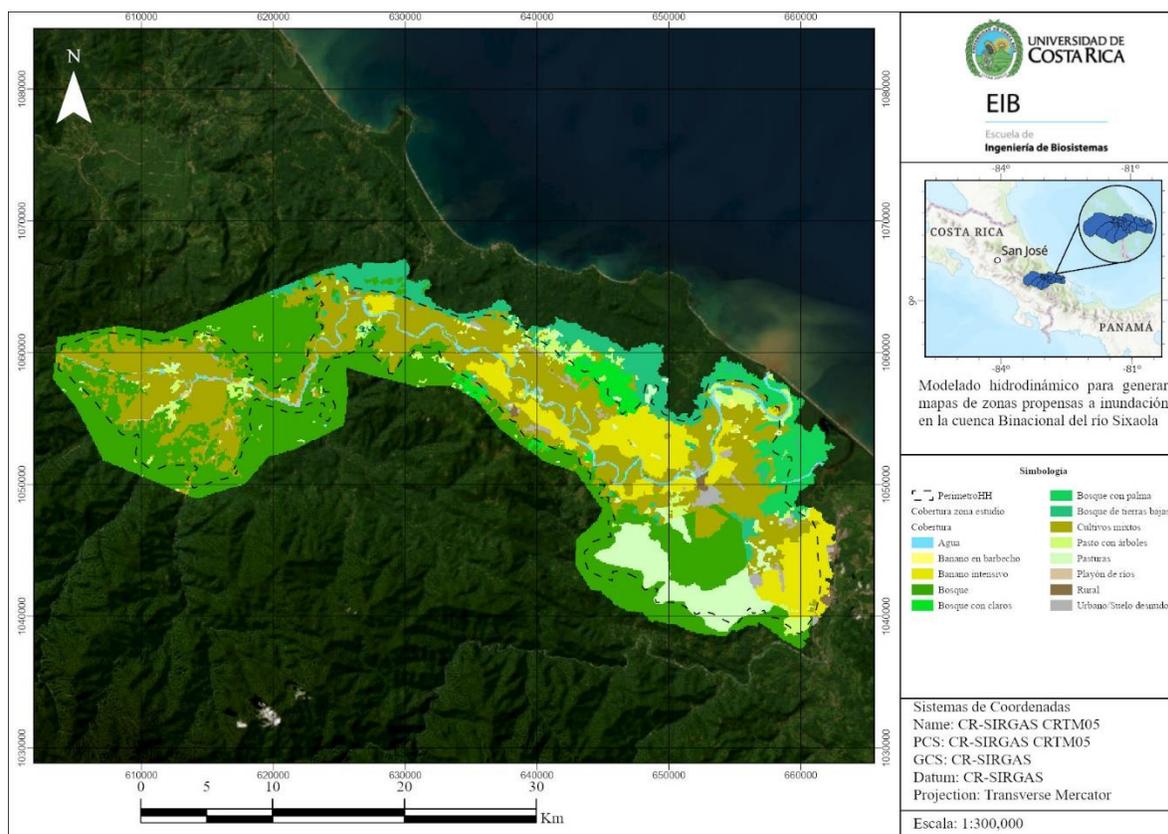
4.2 Rugosidad del terreno

La ecuación de Manning se usará para representar las pérdidas de energía a lo largo del cuerpo de agua. Este coeficiente incluye los efectos de fricción por la rugosidad y/o obstáculos a lo largo del cauce del agua, así como los cambios en la dirección del cauce principal. Estos efectos se cuantifican mediante el coeficiente "n" de la ecuación de Manning aplicado a la cobertura.

La rugosidad del terreno representa la fricción del suelo (valores de n de Manning), crucial para simular con precisión la interacción del flujo con el terreno. Para asignar estas rugosidades se utilizó la cobertura editada para la zona de análisis donde se asignó a cada cobertura un valor de n de Manning según la literatura (Tabla 20). En la Figura 37 se presenta la cobertura aplicada al dominio de la simulación hidráulica.

Tabla 20. Rugosidad de Manning para la zona de estudio.

Tipos de cobertura	n de Manning
Agua	0.045
Banano en barbecho (renovación o abandonado)	0.06
Bosque	0.12
Bosque con claros (ralo)	0.07
Bosque de tierras bajas (anegadas)	0.09
Bosque mezclado con palma	0.075
Cultivo de banano intensivo	0.055
Cultivos mixtos (plátano, pastos, etc)	0.04
Pasto con árboles	0.05
Pasturas	0.035
Playón de ríos	0.04
Urbano/Suelo desnudo	0.1
Rural	0.06

**Figura 37.** Cobertura en zona de análisis hidráulico.

4.3 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera o de borde utilizadas en este análisis establecen los hidrogramas de caudal que alimentan el sistema en diferentes entradas al modelo hidráulico para diferentes periodos de retorno, la pendiente de energía que en este caso es similar al lecho de fondo del río y un caudal natural promedio anual de cada entrada. Además, se incluyen las condiciones de frontera a salida de la cuenca, asignándole flujo normal con una pendiente de la línea de energía, la cual se considera similar a la pendiente del terreno. El régimen de flujo analizado es mixto y gradualmente variado, el cual considera la combinación de flujos subcríticos y supercríticos dentro de la malla, dando flexibilidad para los cambios de régimen de flujo (subcrítico y supercrítico) en la simulación por los cambios de pendiente del terreno.

El caudal natural promedio anual se tomó de un estudio realizado donde se analizó los caudales promedio históricos de 33 años con información hasta el 2009 (ICE, 2010). Se realizó una relación de los caudales reportados con el área de cada una de las entradas del modelo.

Se establecen 18 entradas en el modelo hidráulico distribuidas a lo largo de la cuenca. En la Tabla 21 se encuentran los detalles de las condiciones de frontera. En la **Figura 38** se presenta un ejemplo de los hidrogramas para un periodo de retorno de 50 años, los otros hidrogramas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 100 años se encuentran en el Anexo.

Se establece un mallado con una resolución de 40 metros y un área de refinamiento de la malla en el cauce principal del río Sixaola de 10 metros, con una transición gradual de 20 m entre ambas resoluciones con el objetivo de tener una mejor definición de las velocidades y profundidades del agua en el cauce del río y su planicie.

Los hidrogramas de entrada tienen una resolución temporal de 5 minutos. El intervalo de tiempo de la simulación es de 5 segundos adaptable al número de Courant con el objetivo de evitar inestabilidades en el modelo por los cambios en el tamaño de los elementos y los cambios de velocidades.

Tabla 21. Condiciones de frontera para modelo hidráulico.

Entradas	Área (km²)	Caudal natural (m³/s)	Pendiente línea de energía	Tipo de frontera
Inter Valle 1	35.37	2.9	0.01005	Interna
Coen 2	23.78	2.0	0.01117	Externa
Unión Coen B	391.45	32.2	0.00759	Externa
Lari	306.12	28.6	0.03102	Externa
Sixaola 1	142.57	11.2	0.00054	Interna
Sixaola 2	91.53	7.2	0.00276	Externa
Sixaola 3	132.87	10.4	0.00042	Interna
Sixaola 4	129.37	10.1	0.00393	Externa
Sixaola 5	145.43	11.4	0.0007	Interna
Inter Valle	14.6	1.2	0.01265	Interna
Unión Telire Q	907.28	76.0	0.00736	Externa
Telire 2	44.82	3.8	0.01211	Interna
Telire 4	20.44	1.7	0.00451	Externa
Unión Telire 3-5	47.74	4.0	0.01053	Externa
Uren	262.46	24.1	0.00748	Externa
Uren 1	35.14	3.2	0.03283	Externa
Uren 2	30.32	2.8	0.00108	Interna
Unión Yorkin	293.18	26.9	0.00241	Externa
Salida	-	-	-	Externa
Salida 1	-	-	-	Externa
Salida 2	-	-	-	Externa

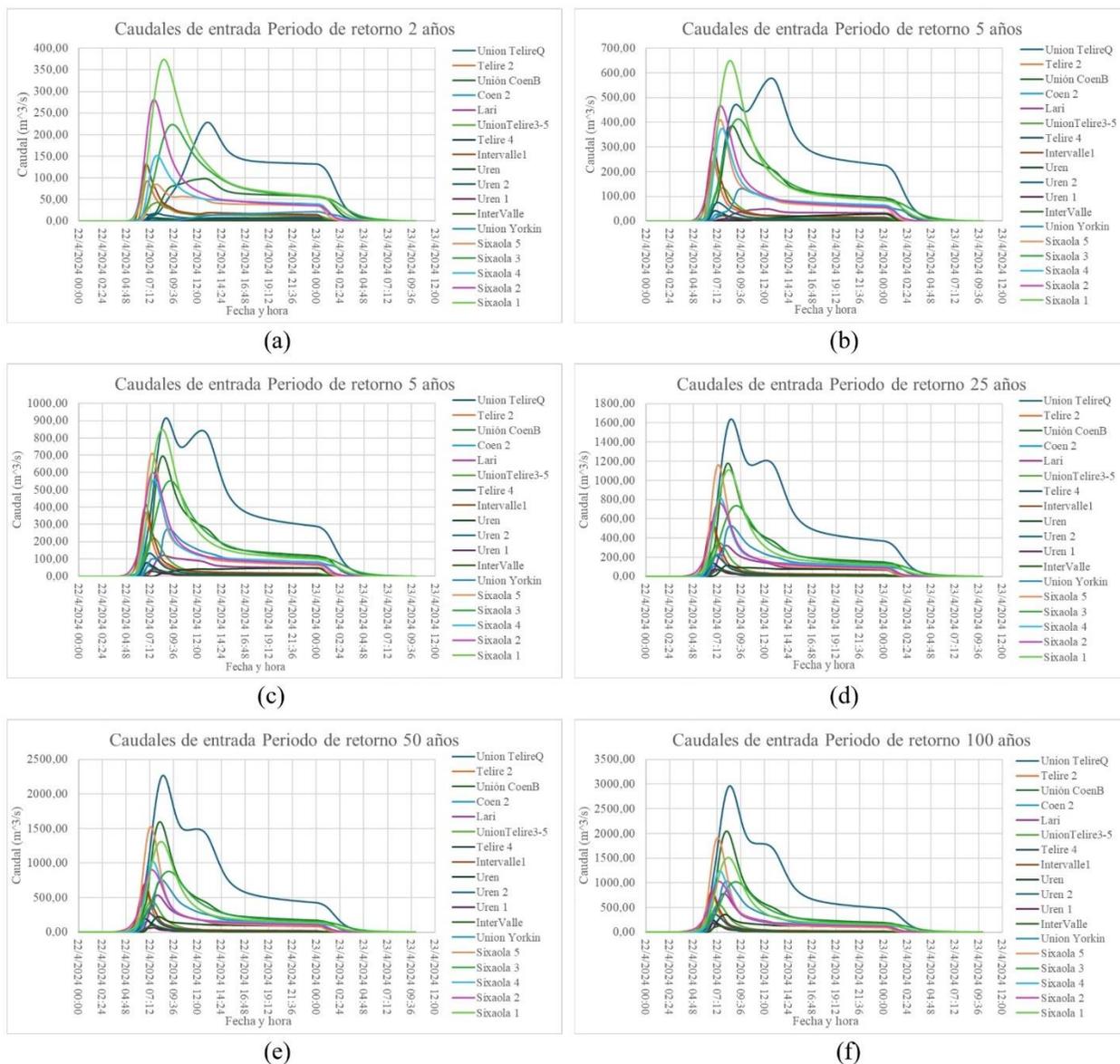


Figura 38. Entradas del modelo para un periodo de retoro de 50 años.

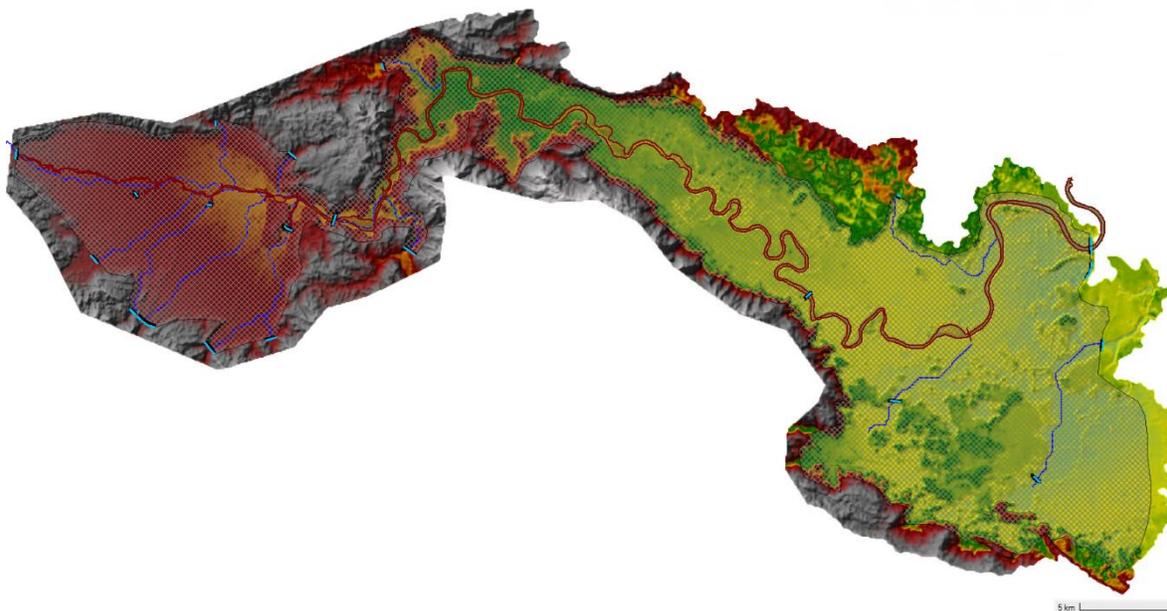


Figura 39. Localización de las entradas y salidas del modelo hidráulico y mallados generados.

Se incorpora el puente del Sixaola en la simulación localizado en el Puente Binacional Sixaola de la ruta nacional N° 36, el cual cuenta con 3 series de pilas de 1.6 metros de diámetro y una superficie de rodamiento con un ancho de 20 metros.

La parte alta y media de la cuenca se presenta ríos trenzados con características complejas para la simulación hidráulica ya que se encuentran en zonas con mayor energía hidráulica, lo que favorece la movilización de sedimentos. Al presentar tener múltiples canales entrelazados el flujo de agua se distribuye en varias ramificaciones que cambian dinámicamente con el tiempo. Esto genera **un alto dinamismo morfológico** y los canales cambian de forma, posición y profundidad debido a la sedimentación y la erosión constante.

Estas características de ríos generan problemáticas para la simulación de inundaciones principalmente cuando no se cuenta con modelos del terreno de alta resolución y una malla fina para captar los flujos entre canales. La división en múltiples canales y su movilidad dificulta la definición de la geometría de la malla por no contar con un solo canal preferencial.

Al realizar varias pruebas de simulación con el mallado generado es necesario definir de una mejor forma los flujos preferenciales obtenidos de forma automática por ArcHydroTools. Para esto se utilizan perfiles de los ríos por donde según el MED tiene preferencia el flujo principal ya que en estas secciones no se logra obtener un desarrollo adecuada para encausar la corriente de agua. Se realiza de forma manual modificaciones a la topografía existente forzando una sección transversal uniforme dentro del MED para cada tramo de entrada al modelo (líneas azules en la Figura 34).

4.4 Resultados de Simulación Hidráulica

El uso de HEC-RAS 2D para la modelación hidráulica proporciona una variedad de resultados útiles en estudios de inundaciones y gestión de recursos hídricos. Entre los resultados más sobresalientes se incluyen:

- Mapas de profundidad de inundación: Visualizan las áreas afectadas y la profundidad del agua durante diferentes escenarios de inundación.
- Velocidad del flujo: Muestra la rapidez con la que el agua se mueve en distintas zonas, lo que es clave para evaluar el riesgo de erosión y daños.
- Tiempo de llegada de la inundación: Permite identificar cuándo las áreas serán afectadas, útil para sistemas de alerta temprana.
- Zonas de flujo crítico: Identifica áreas donde el flujo es más peligroso o puede causar daño estructural por la velocidad y profundidad del agua.

Estos resultados permiten planificar infraestructuras, gestionar riesgos y mitigar daños causados por inundaciones. A continuación, se muestra como ejemplo la inundación de 100 años de periodo de retorno con el fin de identificar zonas que necesitan especial cuidado.

A continuación, se presentan ejemplos de visualización para una inundación de 100 años de periodo de retorno, posteriormente se mostrarán los mapas de inundación para cada uno de los periodos de retorno.

En la Figura 40 se presenta la profundidad de la inundación para un periodo de retorno de 100 años tanto para la planicie aguas arriba de Sureka y como se va moviendo el flujo por el canal principal. También se observa la profundidad del agua en la parte baja de la cuenca.

En la Figura 41 y Figura 42 se observan las velocidades y los vectores de velocidad para diferentes áreas desde aguas arriba hasta aguas abajo del río Sixaola. En la Figura 42 es posible identificar el momento donde se presenta banco lleno e inicia el desbordamiento del río y como se expande por las zonas inundables afectando las zonas de cultivo y las poblaciones aledañas.

En las Figuras 43 a la Figura 54 se presentan la elevación de la superficie de agua en los diferentes puntos en toda la zona modelada, así como las velocidades para los diferentes periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

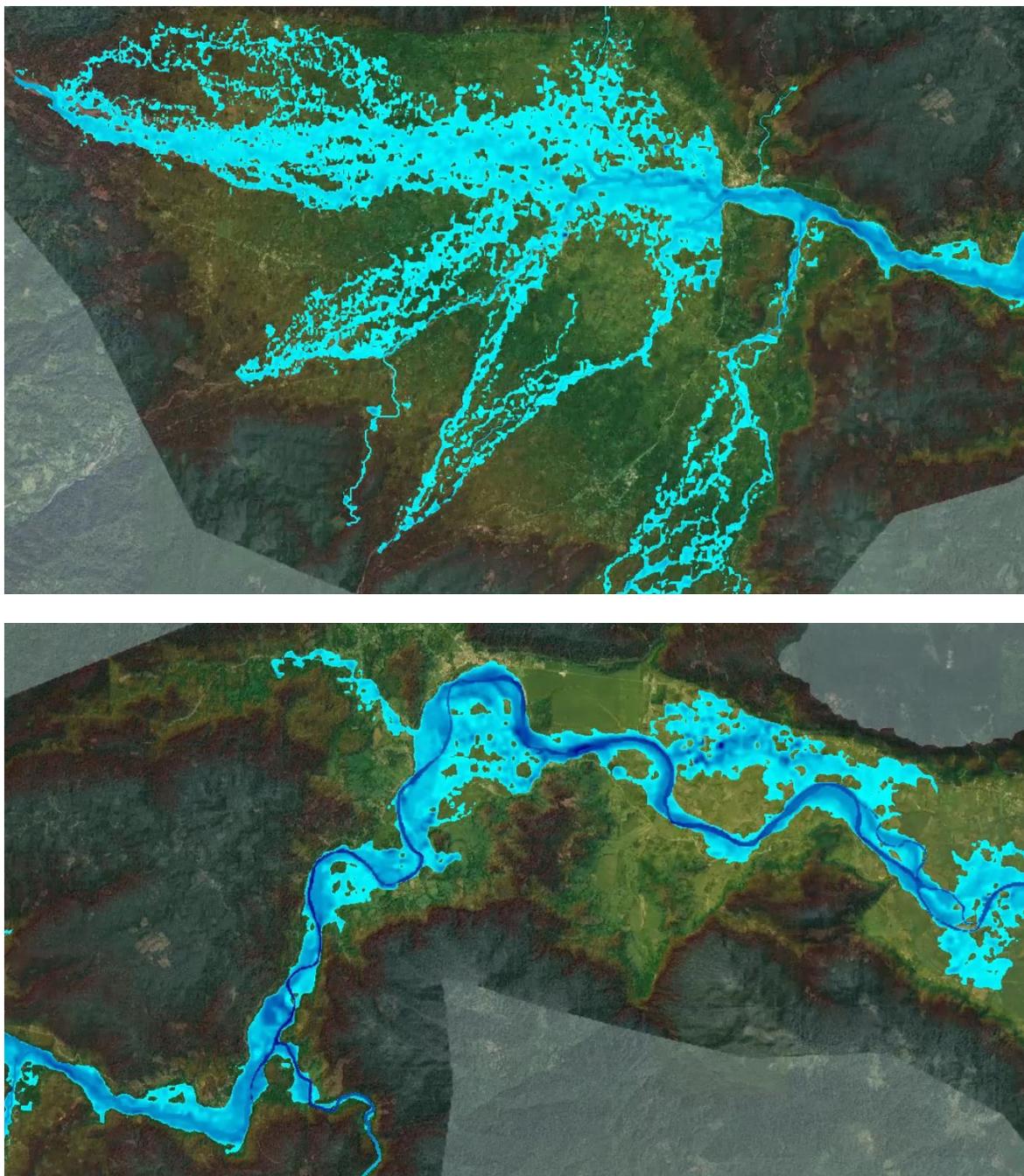


Figura 40. Profundidad máxima de inundación para un periodo de retorno de 100 años.

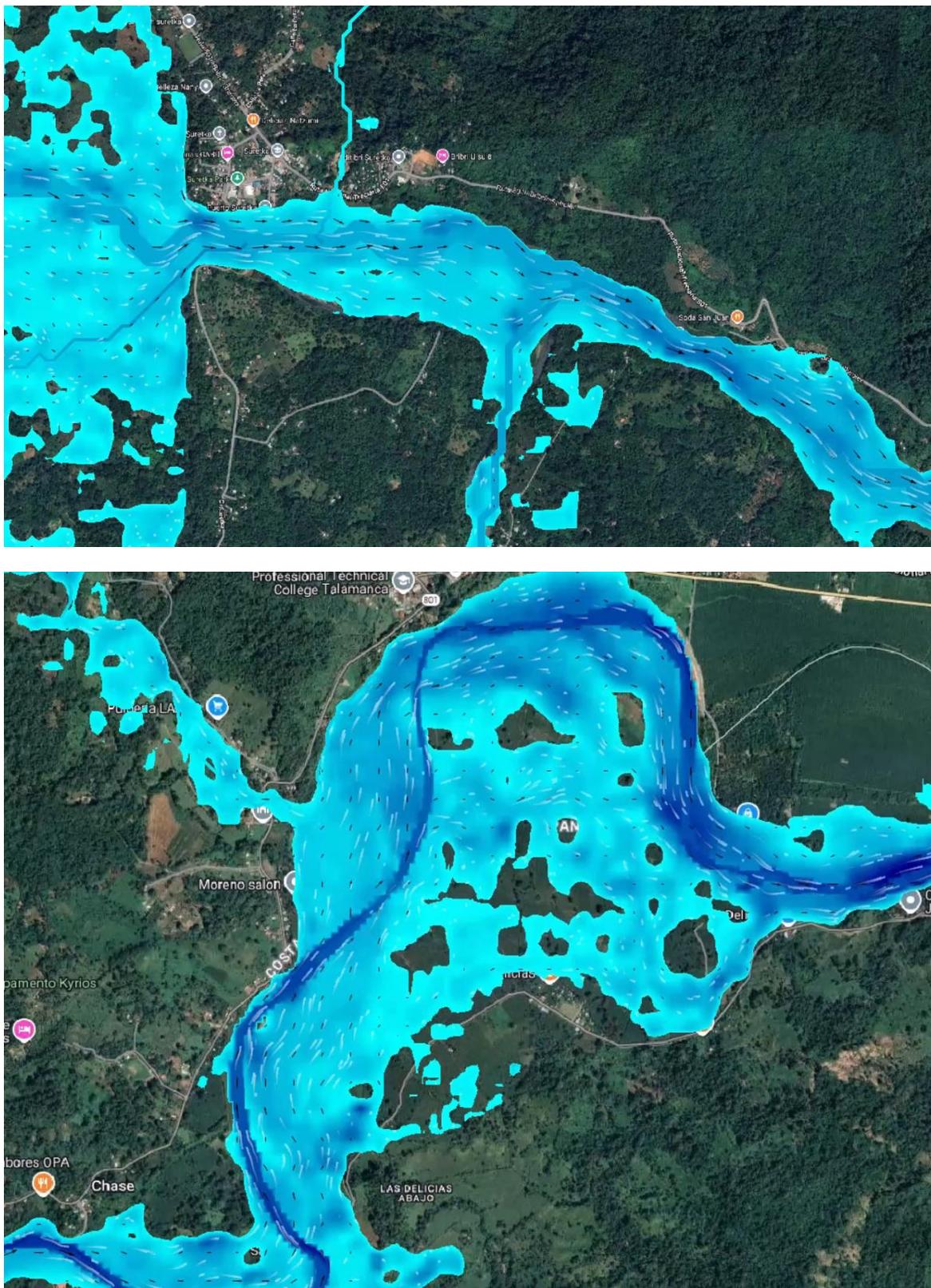


Figura 41. Velocidades máximas en planicie de inundación aguas arriba de Sureka (Bratsi) y aguas abajo.

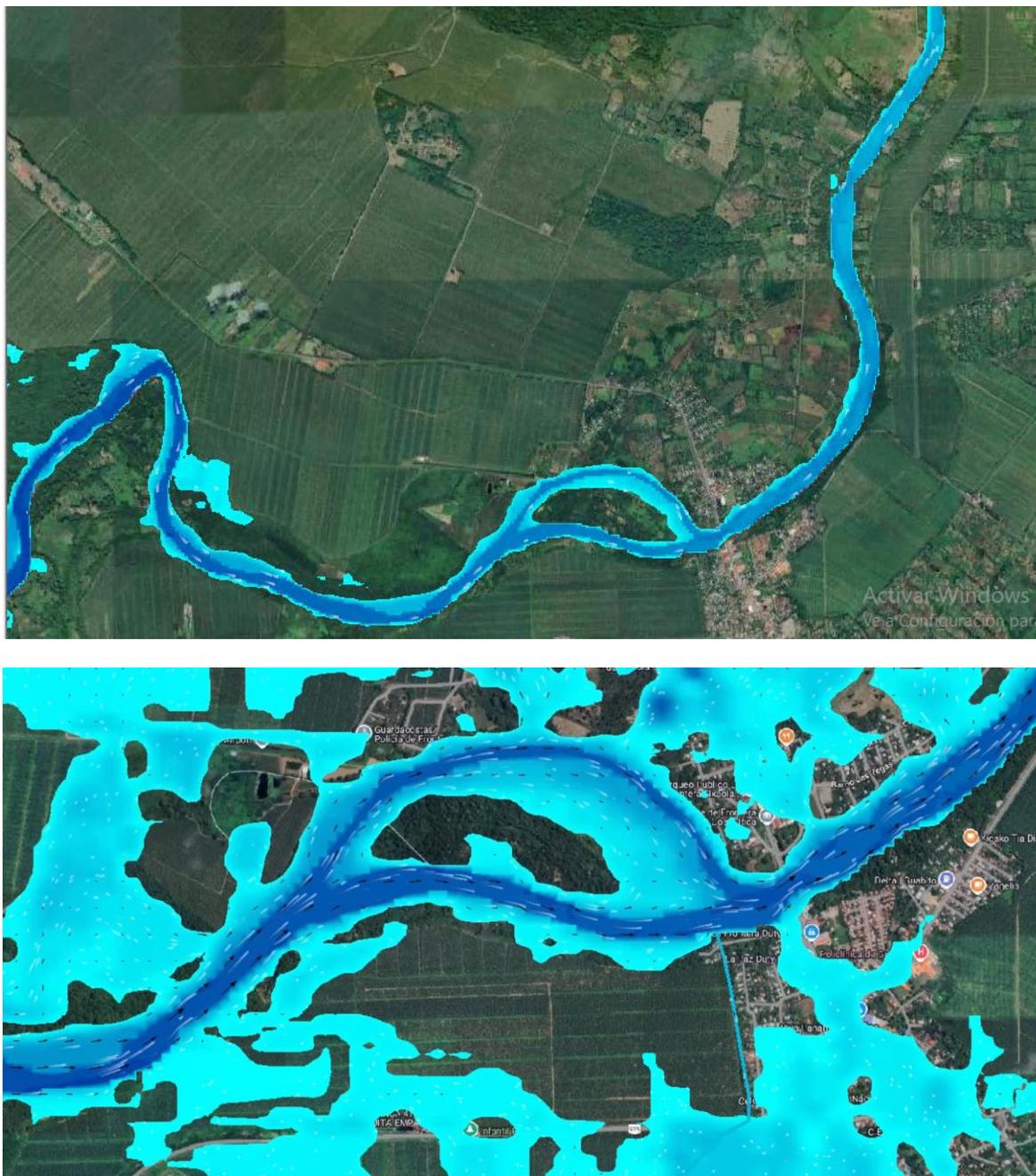


Figura 42. Velocidades de inundación en diferentes tiempos sobre Sixaola.

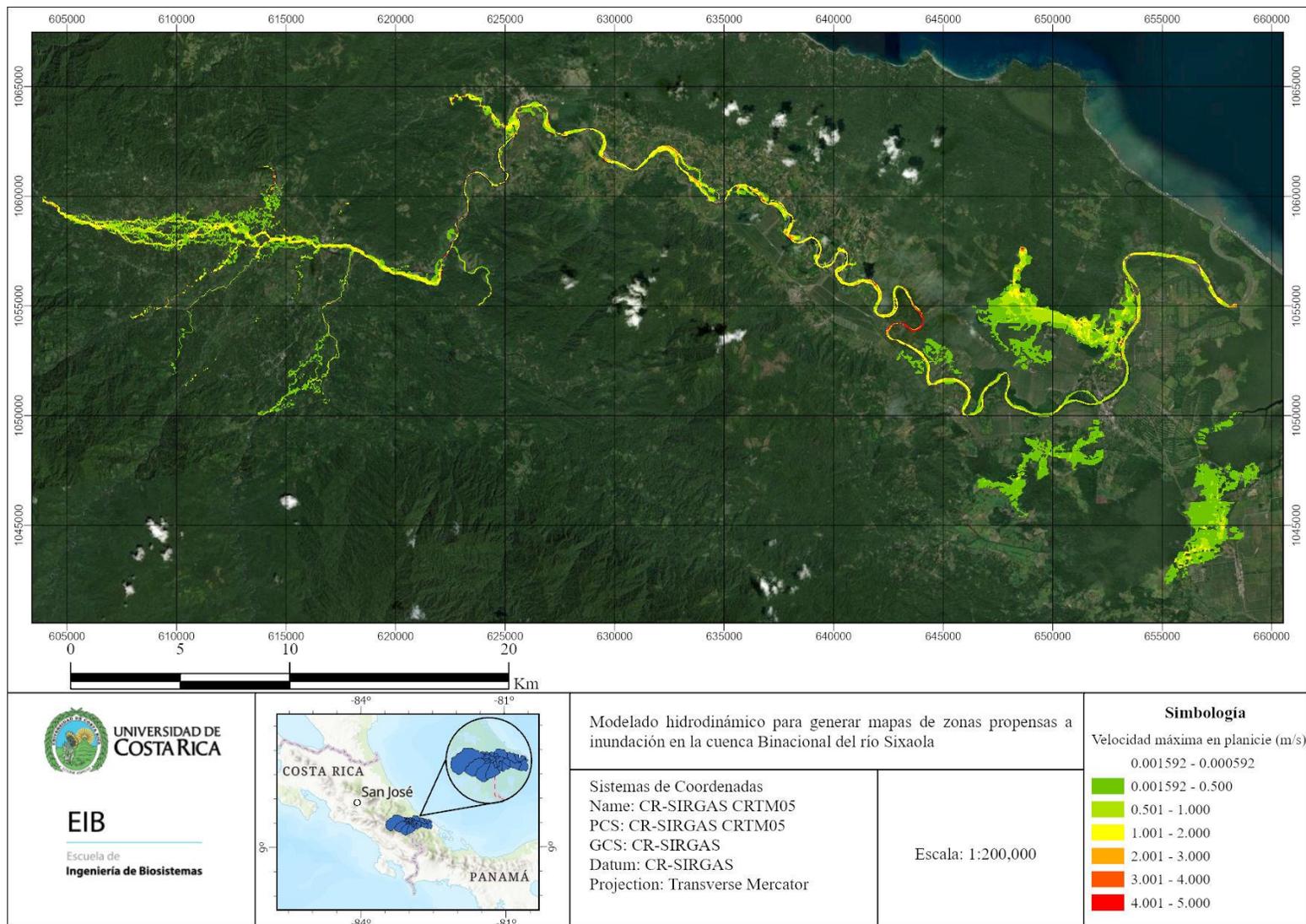


Figura 43. Velocidad máxima de inundación en planicie para un periodo de retorno de 2 años.

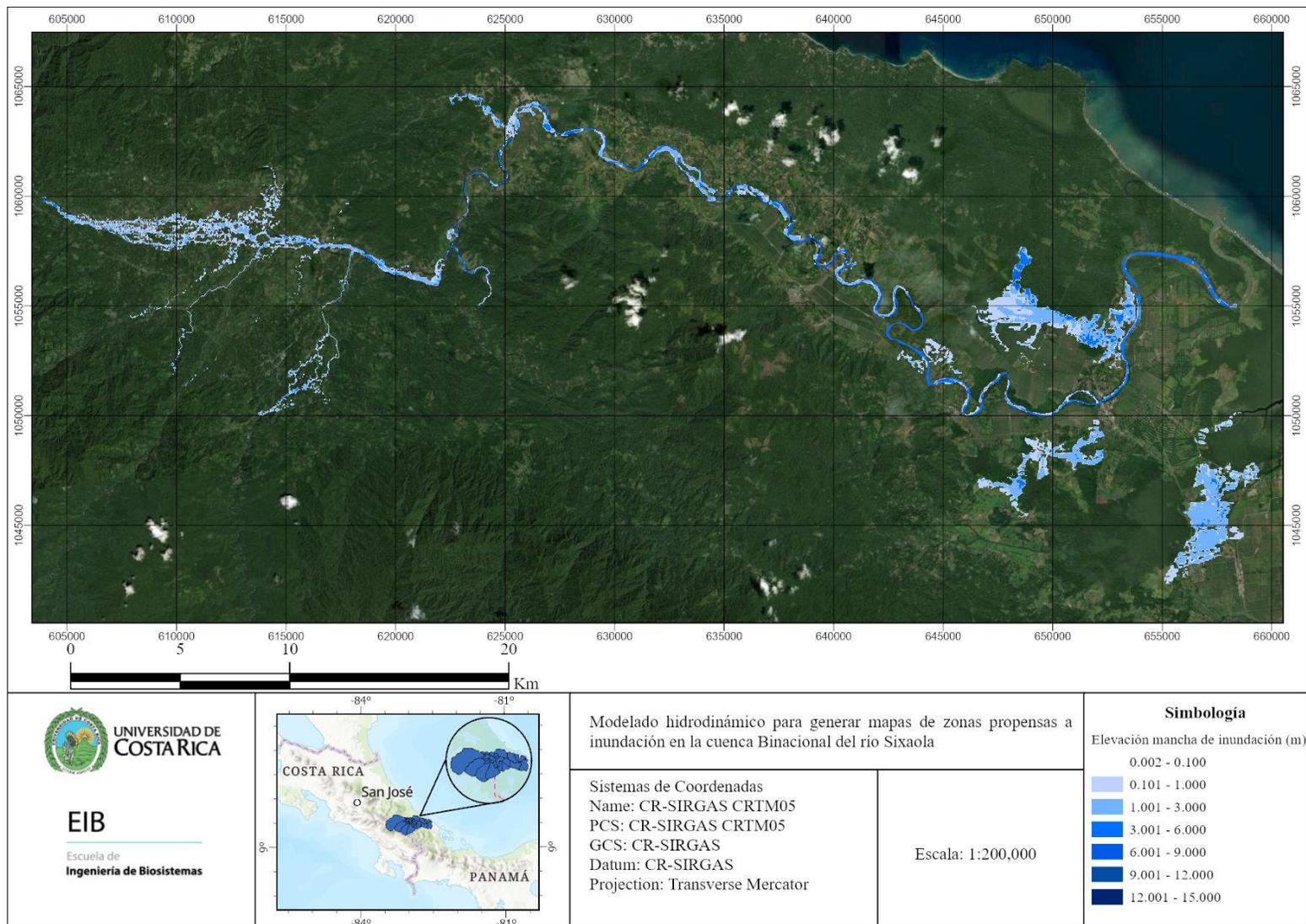


Figura 44. Elevación mancha de inundación máxima para un periodo de retorno de 2 años.

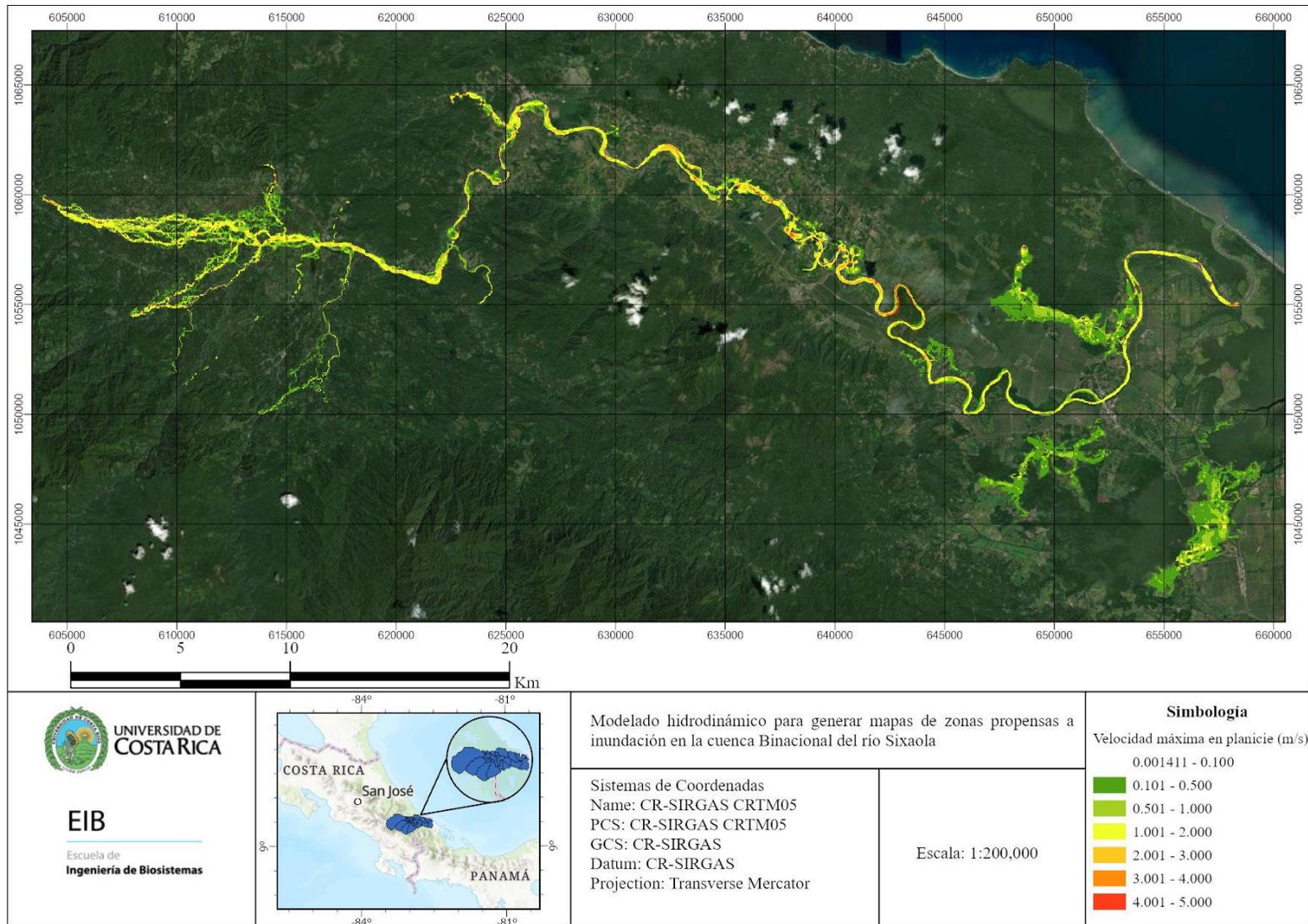


Figura 45. Velocidad máxima de inundación en planicie para un periodo de retorno de 5 años.

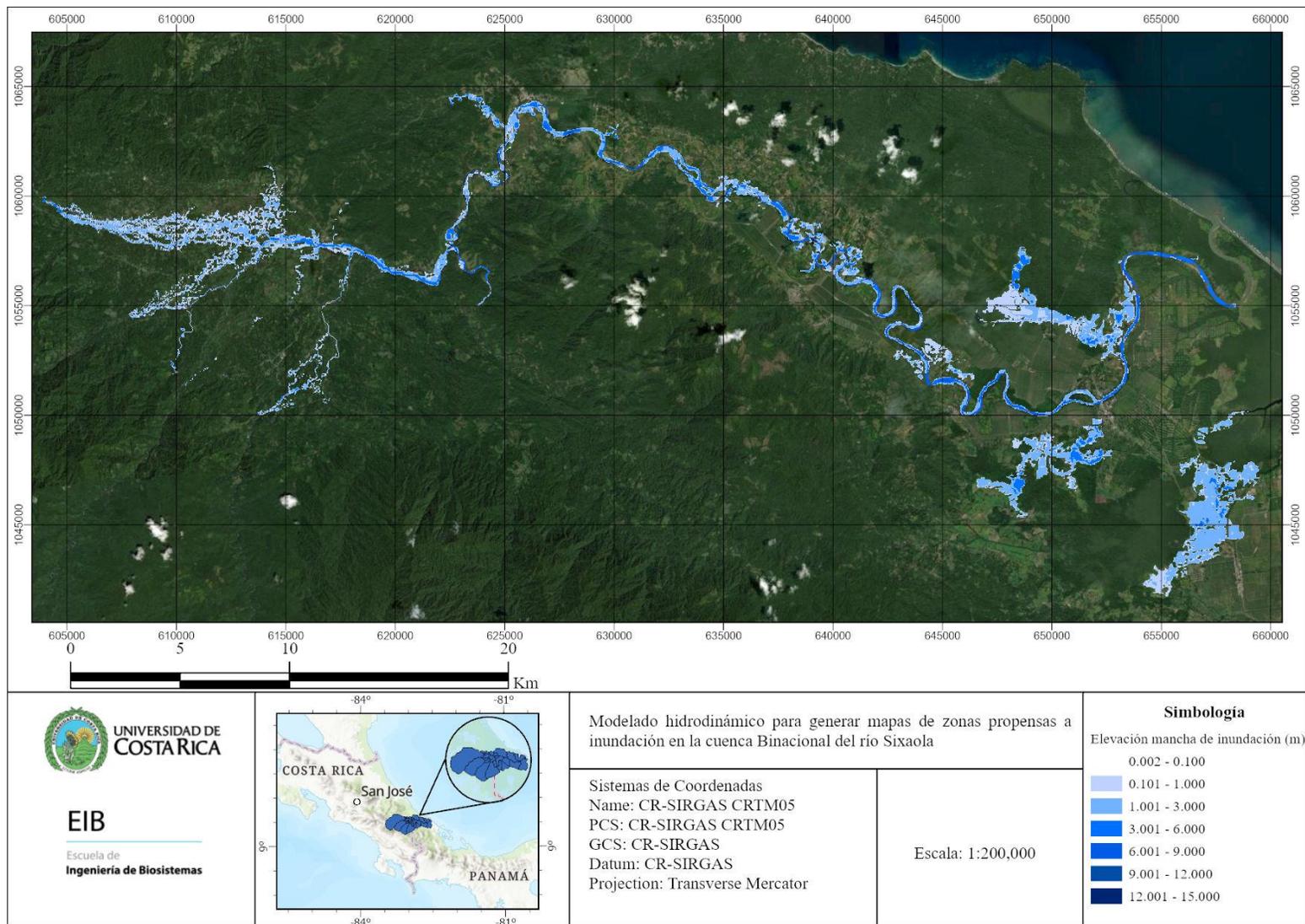


Figura 46. Elevación mancha de inundación máxima para un periodo de retorno de 5 años.

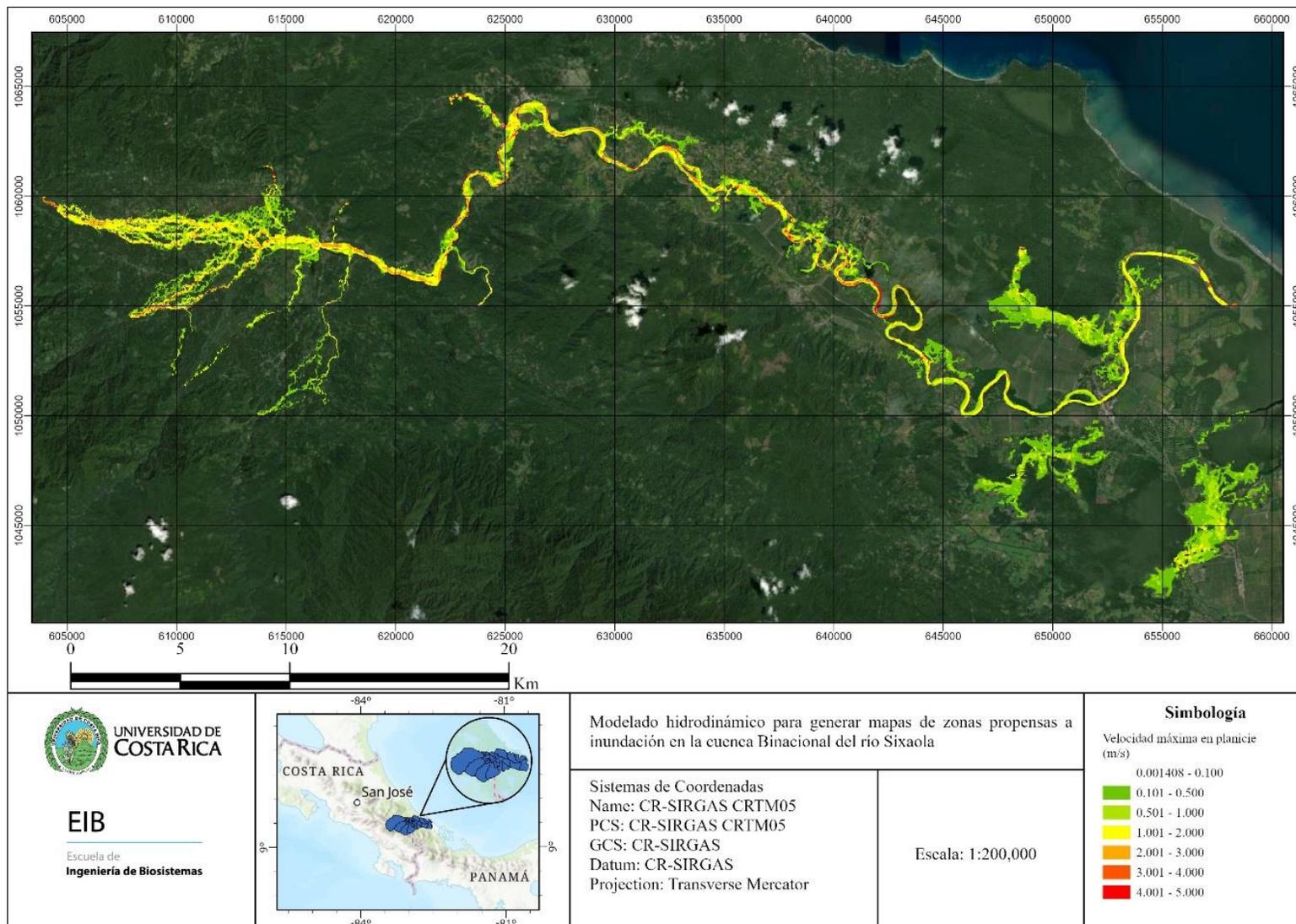


Figura 47. Velocidad máxima de inundación en planicie para un periodo de retorno de 10 años.

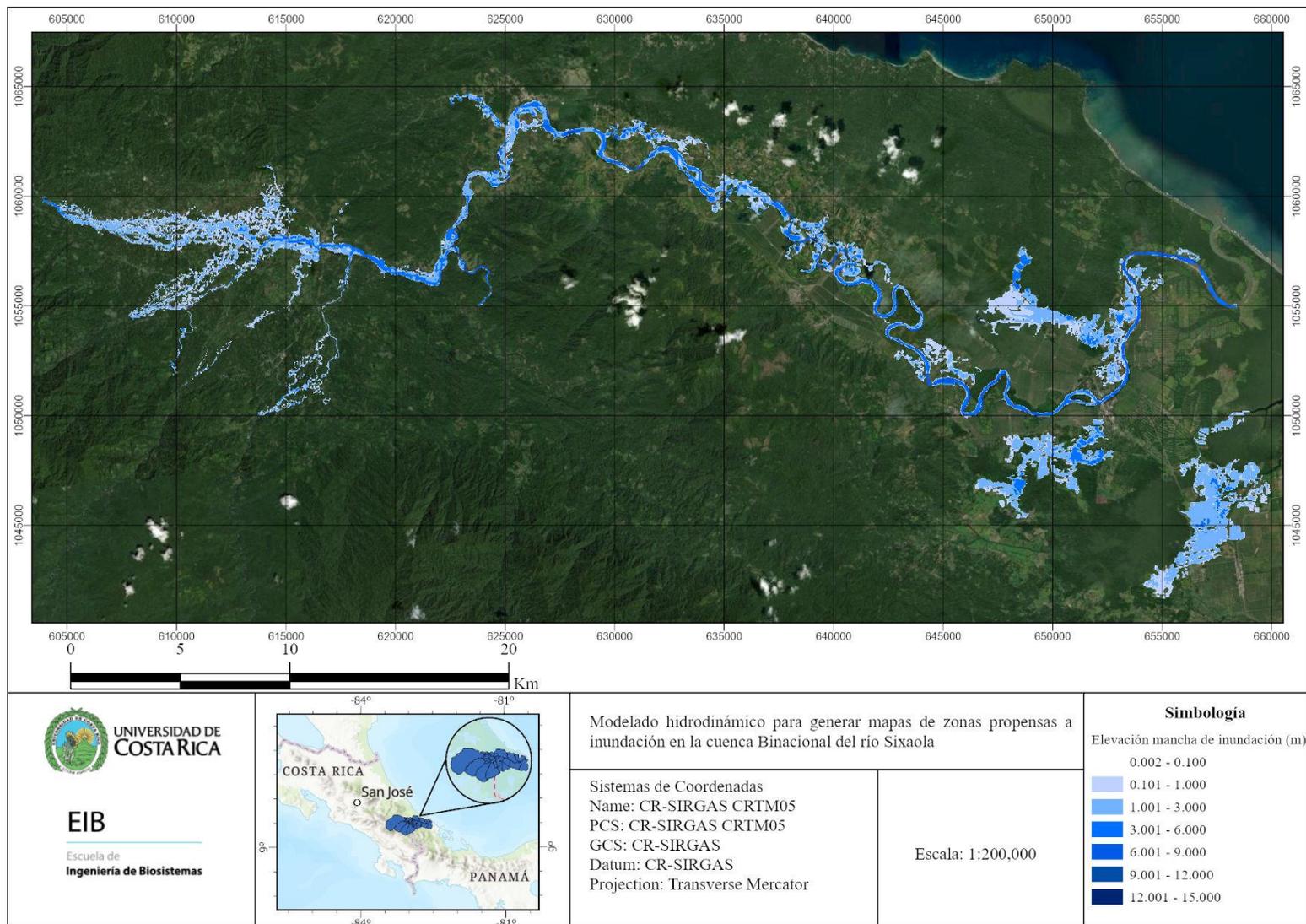


Figura 48. Elevación mancha de inundación máxima para un periodo de retorno de 10 años.

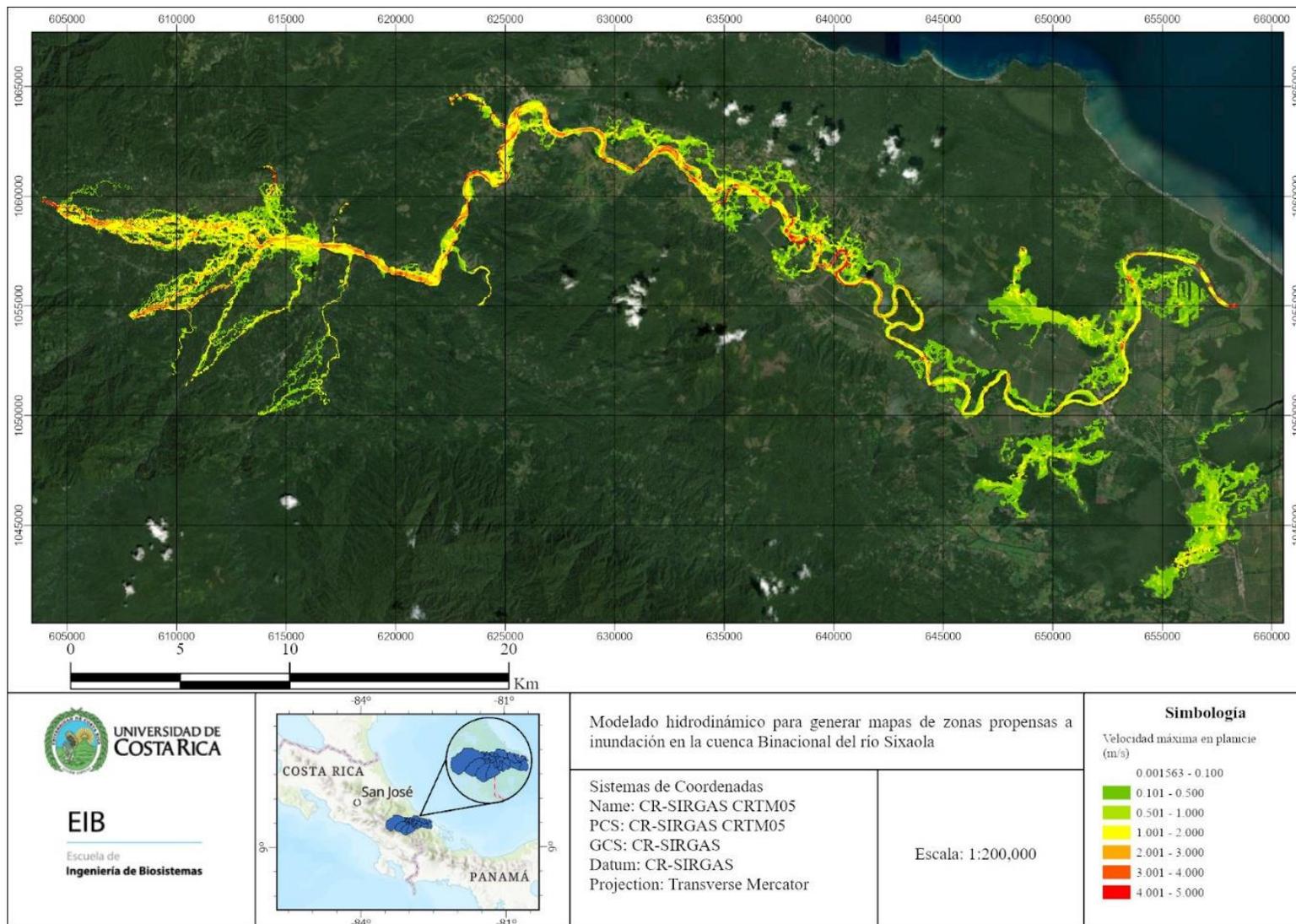


Figura 49. Velocidad máxima de inundación en planicie para un periodo de retorno de 25 años.

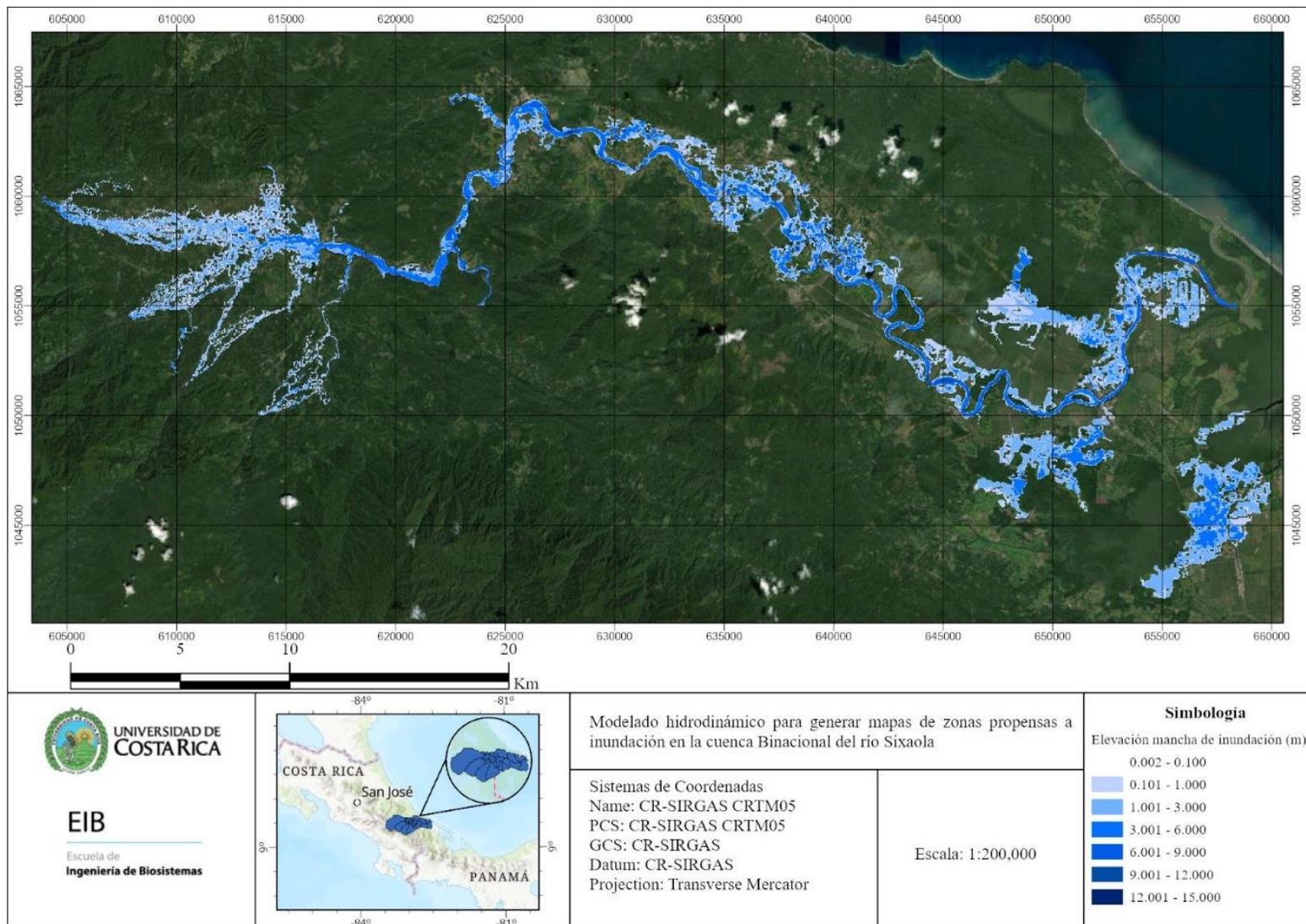


Figura 50. Elevación mancha de inundación máxima para un periodo de retorno de 25 años.

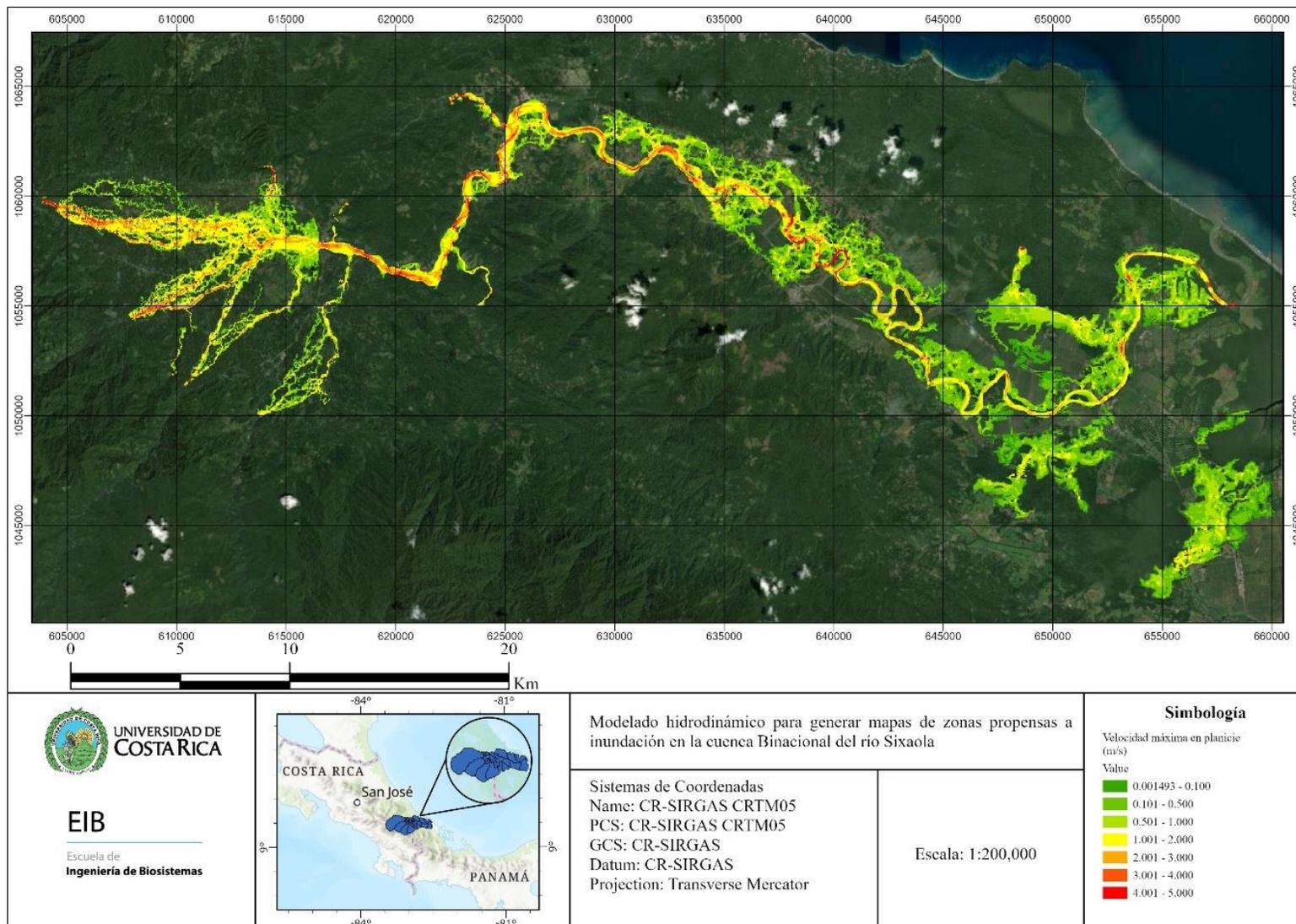


Figura 51. Velocidad máxima de inundación en planicie para un periodo de retorno de 50 años.

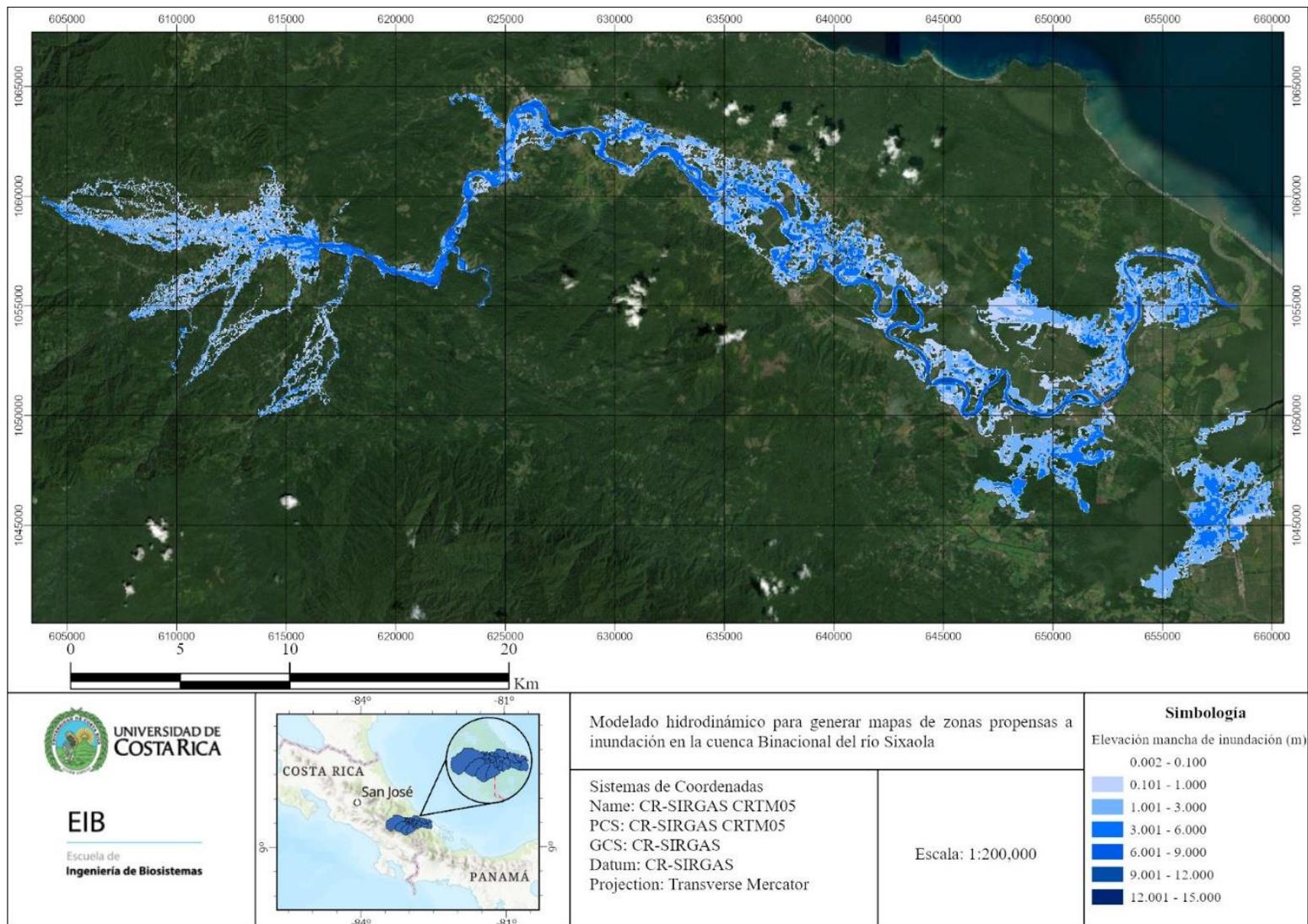


Figura 52. Elevación mancha de inundación máxima para un periodo de retorno de 50 años.

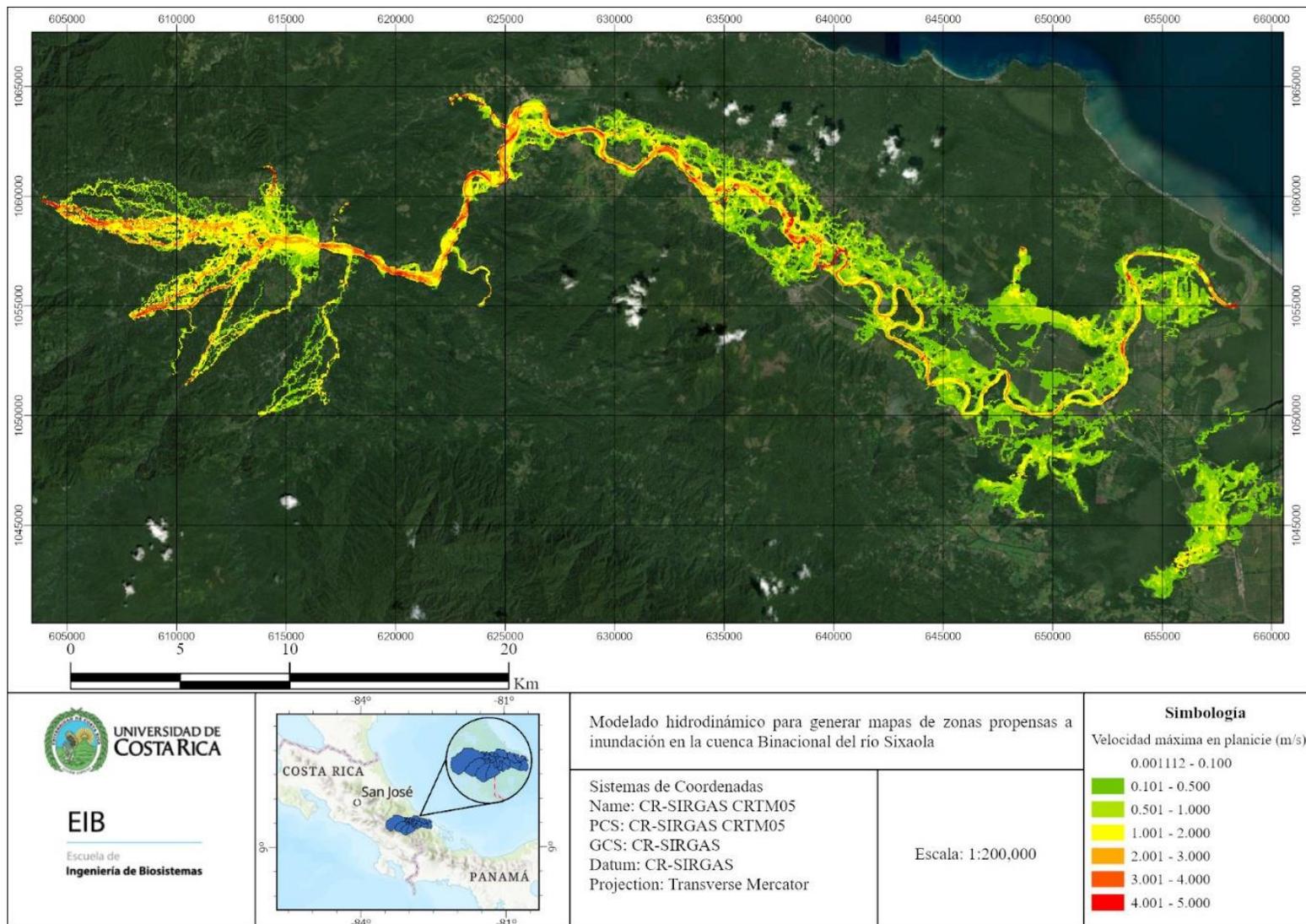


Figura 53. Velocidad máxima de inundación en planicie para un periodo de retorno de 100 años.

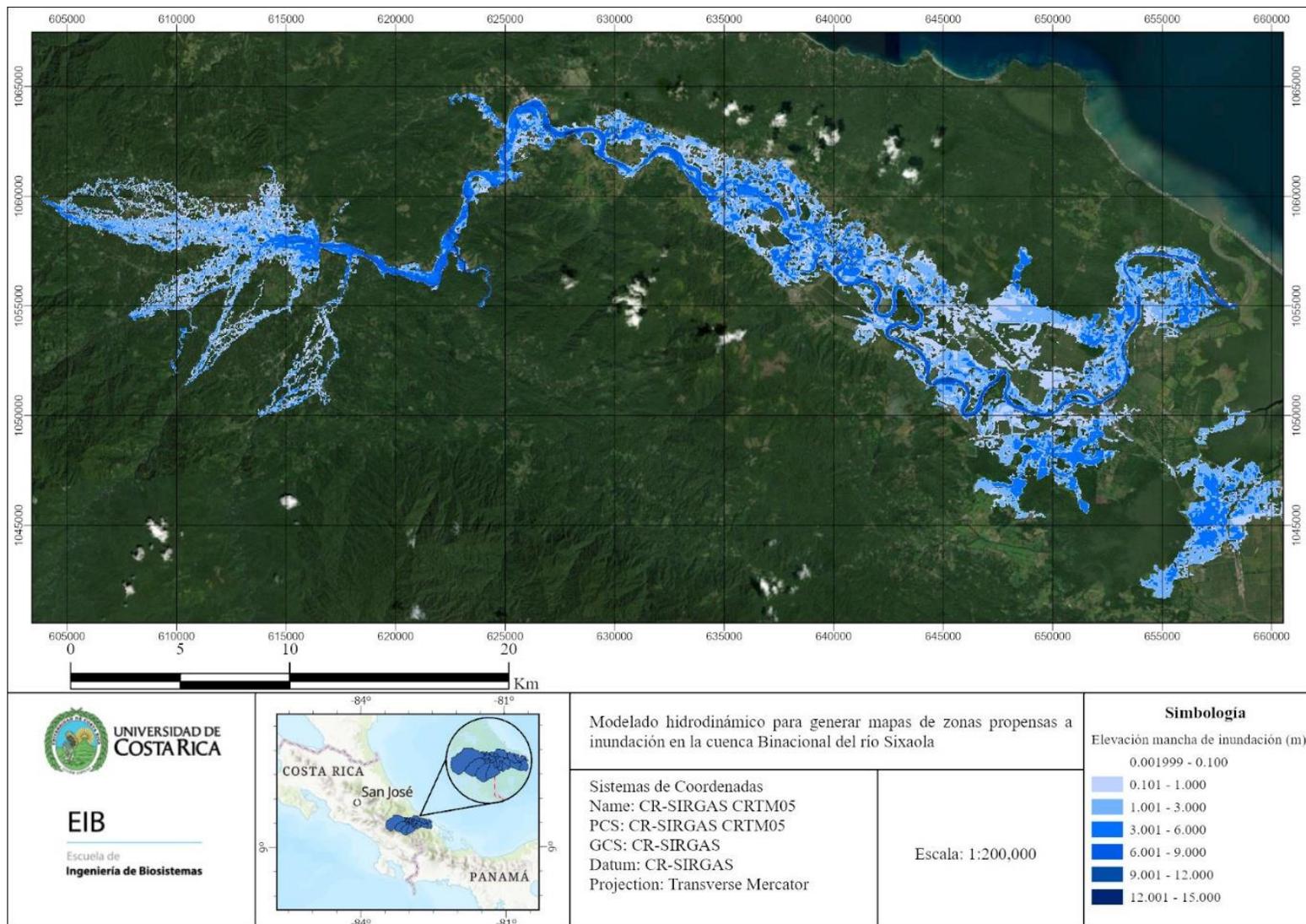


Figura 54. Elevación mancha de inundación máxima para un periodo de retorno de 100 años.

5 Conclusiones

En este trabajo fue posible tener una mayor comprensión del riesgo al identificar las áreas de mayor riesgo de inundación con la identificación de las zonas críticas que podrían ser más afectadas.

Fue posible determinar la profundidad y velocidad del agua para diferentes periodos de retorno y de esta forma definir la severidad de la inundación, destacando las áreas con mayor riesgo para la seguridad de las personas y las infraestructuras.

La modelación hidrodinámica tiene beneficios para mostrar de una forma clara los mapas de inundación que indican la extensión y la profundidad del agua para diferentes escenarios (por ejemplo, lluvias extremas o crecidas de ríos).

El modelo permite preveer situaciones futuras con lluvias más intensas y frecuentes y simular el efecto de futuras propuestas de medidas de mitigación como diques, canales de desvío, etc.) para proteger las áreas críticas. También, es funcional como herramienta para los sistemas de alerta temprana, donde se puede tener propuesta de sistemas de monitoreo y alerta para que la comunidad se prepare con anticipación.

Con este tipo de herramientas es posible coordinar acciones comunitarias como sugerencias de planes de evacuación y medidas preventivas con la participación activa de las comunidades.

Si bien no se pueden evitar las inundaciones, se pueden reducir sus impactos mediante una planificación adecuada y medidas preventivas.

La **capacidad predictiva del modelo** 2D para entender el comportamiento del agua en el área de estudio va a depender de las limitaciones de la topografía utilizada, de esta forma se tiene que para la cuenca media (Telire) el modelo cuenta solamente con información topográfica base de media resolución (30m) por lo que su utilización en ríos trezados desde de afinarse con un levantamiento topográfico más preciso. Si bien, se incluye la batimetría del río desde Suretka hasta la desembocadura, la información de la planicie continúa siendo de mediana resolución, así que es recomendable para zonas de alto impacto realizar un detalle topográfico con el fin de mejorar la incertidumbre del modelo.

6 Equipo de Trabajo

Yo, Ing. Alejandra M. Rojas González, Ph.D, certifico que los cálculos incluidos en este estudio fueron coordinados, desarrollados y revisados por mi persona. Relacionado a este estudio, yo certifico que, a mi conocimiento, la información incluida en este documento es correcta, confiable y completa.

Además, participaron en la elaboración de datos, tablas, mapas y formato del documento los siguientes asistentes de la carrera de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica.

Nicole Salazar Mora

Jurgen Díaz Cascante

Ignacio Moreno Hidalgo

7 Referencias

- Barrantes Castillo, G. (1995). Zonificación de amenazas por inundación en el Valle del Río Sixaola. Tesis de Licenciatura en Geografía Física. Escuela de Geografía, Universidad Nacional. 125 p.
- Barrantes Castillo, G., & Vargas Bogantes, J., (2011). La Zonificación de amenaza por inundación como herramienta para el ordenamiento territorial en el Valle del Río Sixaola. *Revista Geográfica de América Central*. N° 46, pp. 67–85.
- Barrantes Castillo, G., Vahrson, W.G., & Mora, S. (1995). Cambios geomorfológicos e hidrológicos inducidos por el terremoto (Mw 7,7) del 22 de abril de 1991 en la provincia de Limón, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 65, 1-19, 2021. doi: 10.15517/rgac.v0i65.46881
- BIOMARCC-USAID (2013) Vulnerabilidad y escenarios bioclimáticos de los sistemas marino-costeros a nivel del caribe centroamericano. Costa Rica
- Campos Zumbado, J. (2012). *Inventario y caracterización de los Sistemas de Alerta Temprana Costa Rica*.
- Castillo, G. B., & Vargas Bogantes, J. (2011). No 46 I Semestre. *Revista Geográfica de América Central*, 46, 67–85.
- Comisión Nacional de Emergencias (CNE). (1995). Inundaciones de Río Sixaola en Costa Rica y Panamá. CNE.
- Estrategia Regional de Desarrollo Sostenible de la Cuenca Binacional de la Cuenca del Río Sixaola, EPYPSA-INCLAM (2006). Análisis de actores sociales e institucionales en la Cuenca del Río Sixaola. Consultado: 27/05/24. Disponible en: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=756354>
- Huguenin, C. & Vega, R.A. (2016). Análisis de inundación causado por el aumento del mar en la región de Sixaola. <https://www.researchgate.net/publication/320020895>
- Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), 2010. Evaluación preliminar del potencial hidroeléctrico aprovechable de la cuenca del río Sixaola. Estudio del Plan Maestro. San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico (IMN). (2024). *Boletín meteorológico*. San José, Costa Rica. 2005-2023. <https://www.imn.ac.cr/boletin-meteorologico>

- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). (2016). *ALOS World 3D - 30m (AW3D30)* [Datos de elevación digital]. https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm
- Nguyen, P., E. J. Shearer, M. Ombadi, V. A. Goroooh, K. Hsu, S. Sorooshian, W. S. Logan, and M. Ralph, 2020: PERSIANN Dynamic Infrared Rain Rate Model (PDIR) for High-Resolution, Real-Time Satellite Precipitation Estimation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 101, E286 E302, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0118.1>
- Rojas, N. (2011). Estudio de Cuencas Hidrográficas de Costa Rica. En *Cuenca Río Sixaola* (pp. 3–23). MINAET.
- Phu Nguyen, Mohammed Ombadi, Vesta Afzali Goroooh, Eric J. Shearer, Mojtaba Sadeghi, Soroosh Sorooshian, Kuolin Hsu, David Bolvin and Martin F. Ralph, 2020: PERSIANN Dynamic Infrared-Rain Rate (PDIR-Now): A Near-real time, Quasi-Global Satellite Precipitation Dataset. *Journal of Hydrometeorology*. Doi: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0177.1>

8 Anexos

8.1 Anexo: Informe de Gira

La gira realizada los días 19, 20 y 21 de setiembre del presente año tuvo como objetivo la caracterización de la zona a partir de visitas a lugares estratégicos de la zona de estudio para determinar parámetros que permitan mejorar el modelo hidrodinámico de inundaciones. Dentro de estos parámetros se consideran: tipo de cobertura a lo largo de la cuenca, ubicación y dimensionamiento de puentes pequeños y del puente principal del Río Sixaola. Además, se determinaron posibles sitios para la instalación de la estación hidrológica.

En la Figura 1 se muestran las zonas visitas, las cuales se distribuyen en los distritos Suretka, Bratsi, Bribri y Sixaola. La ubicación exacta de los puntos establecidos durante la gira se muestra en la Tabla 1.

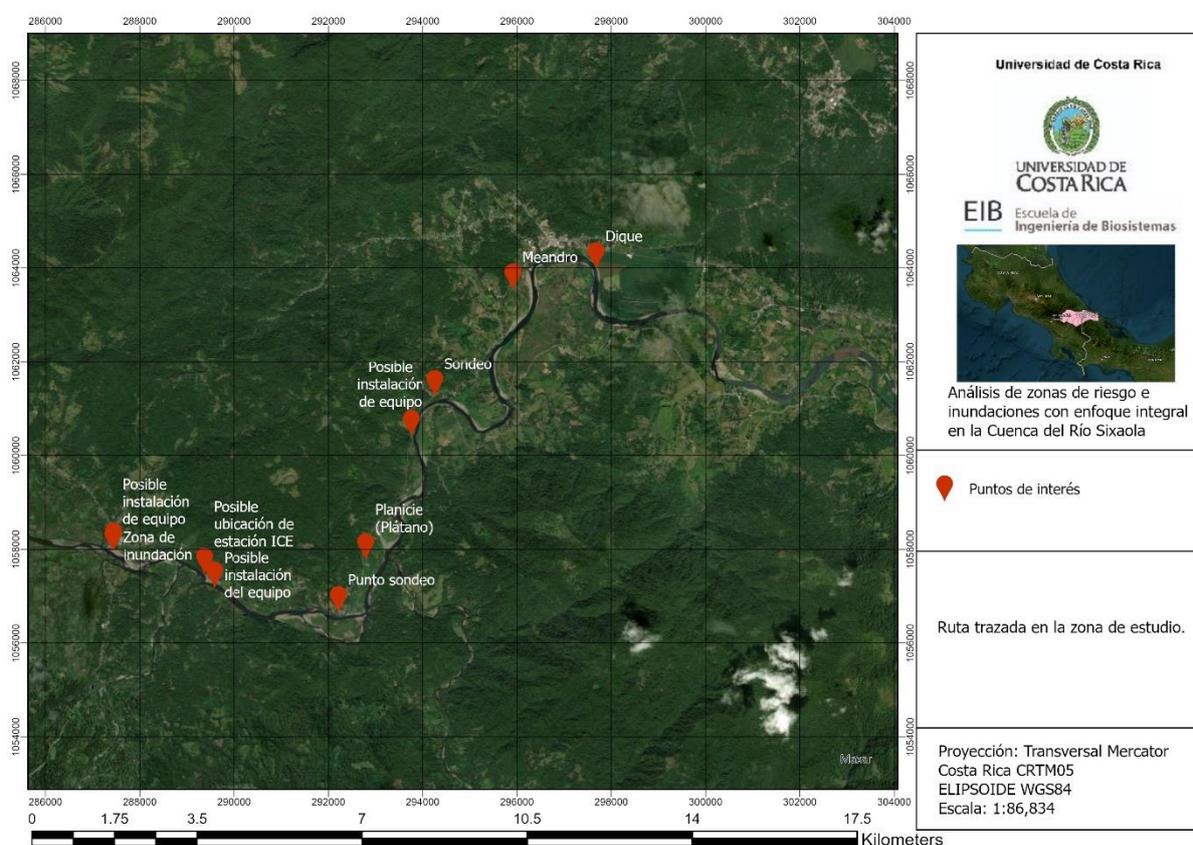


Figura 1. Ruta trazada de la zona de estudio.

Tabla 1. Localización (coordenadas WGS 84) de la ruta en la zona de estudio.

Localización	Identificación
(9.5652959, -82.936693)	Posible punto de instalación, puerto Suretka
(9.565771, -82.9366085)	Zona de inundación, puerto Suretka
(9.5610703, -82.9189767)	Posible ubicación de estación Bratsi
(9.5583741, -82.9170267)	Posible punto de instalación, playón San Juan
(9.5538033, -82.8930995)	Punto sondeo
(9.5640032, -82.8878826)	Planicie (Plátano)
(9.5878826, -82.8791867)	Posible punto de instalación, puente sobre ruta terciaria 801, Bribri-Shiroles
(9.595544, -82.874706)	Punto sondeo
(9.6161989, -82.8597354)	Meandro
(9.6203597, -82.8436723)	Dique

En la Tabla 2 se muestra toda la información recolectada en cada punto de estudio, mientras que en la Tabla 3 se detallan aspectos relacionados con la instalación de la estación hidrológica.

Tabla 2. Resumen de la información recolectada para caracterización de la cuenca del Río Sixaola.

Zona	Observaciones	Fotografías
Río Sixaola	<p>COBERTURA De forma general, la vegetación en ambos extremos del Río es muy constante. Se caracteriza por la presencia de plantas de plátano, banano, árboles medianos y maleza (Figura 2 y 3).</p> <p>DIQUE Se ubica en Calle las Delicias, en Ruta Nacional Primaria 36, se encuentra frente a una bananera. Es de larga extensión y se caracteriza por tener zonas más altas que otras (Figura 4).</p> <p>PUENTE BINACIONAL DEL RÍO SIXAOLA Este puente tiene una longitud total de 260m con pilares separados cada 50m y posee un ancho de 16,5m.</p> <p>Se realizaron medidas de elementos estructurales importantes en el puente, tales como: pilares, circunferencia del estribo, vigas, entre otros (Figuras 5 y 6). Esto para trazar el puente con la mayor precisión posible en el modelo hidrodinámico. En cuanto aspectos sociales, en las riberas del río se visualizan personas lavando ropa o con fines recreativos, especialmente en la ribera del lado de Panamá.</p>	 <p>Figura 2. Vegetación en el Río Sixaola cerca del Tunel Bribrí.</p>  <p>Figura 3. Vegetación del Río Sixaola en las cercanías del puente en la frontera con Panamá</p>



(a) Sección del dique de 2m (b) Sección del dique de 2.5m

Figura 4. Vista lateral de un dique en el Río Sixaola



Figura 5. Vista frontal de la parte inferior del puente en la frontera con Panamá.

		 <p>Figura 6. Vista lateral de la parte inferior del puente en la frontera con Panamá.</p>
--	--	--

Tabla 3. Información sobre los posibles puntos para la ubicación de la estación hidrológica.

ID	Observaciones	Fotografías
<p>Playón San Juan. Primer punto de interés.</p>	<p><i>Coordenadas: (9.5583741, -82.9170267)</i></p> <p><i>Se encuentra en una calle de lastre siguiendo la Ruta 801 / Bribri - Shiroles, al otro lado del Río Telire. Corresponde a una zona privada. La altura del paredón desde la orilla del río es de aproximadamente 5 metros (Figura 7). La zona se encuentra despejada de maleza y hay residentes, por lo que se podría coordinar el cuidado de la estación hidrológica. Cerca de este punto se ubicaba una de las estaciones meteorológicas del ICE identificada como Bratsi.</i></p>	 <p>Figura 7. Zona ubicada a la margen derecha del Río Telire, considera como <u>primer punto de interés</u> para la instalación de la estación hidrológica.</p>



Figura 8. Vista desde la margen del Río Telire, en la primera ubicación del posible punto de instalación de la estación hidrológica.



Figura 9. Vista frontal del primer punto para la instalación de la estación hidrológica.

Puerto Suretka. Segundo punto de interés.

Coordenadas: (9.565771, -82.9366085)

Se ubica en la costa del pueblo Suretka, en esta zona hay un área denominada como “playón” (Figura 10), el cual funciona como zona de alerta a la comunidad, ya que cuando el agua comienza a abarcar más área de la normal en esta zona, es un indicio de la velocidad con la que está aumentando el caudal del río.

A aproximadamente 87m del playón se ubica un local llamado la Soda y comidas rápidas Mary, que se inundó en algunas ocasiones. De acuerdo con las personas que trabajan en este lugar, la altura del agua en esa zona llegó a ser de 1.15m (Figura 11).



Figura 10. Zona crítica de estudio (playón) en la costa del pueblo de Suretka.



Figura 11. Punto de referencia para determinar la altura del agua durante inundaciones en Soda y Comidas Rápidas Mary.

Puente ruta 801. Tercer punto de interés

Coordenadas: (9.5878826, -82.8791867)

Se encuentra en la Ruta Nacional Terciario 801. Su ubicación está aguas abajo, por lo que no funciona muy bien para el sistema de alerta temprana, ya que muy posiblemente, para cuando exista una alerta de inundación en esta zona, aguas arriba ya se inunda. La altura del puente con respecto al río es de al de al menos 10m (Figura 12).

Aproximadamente a 5m del puente se ubica un espacio libre de vegetación que podría funcionar para la instalación de la estación (Figura 13 y 14).



Figura 12. Vista frontal del *puente en las cercanías del tercer punto* para la instalación de la estación hidrológica.



Figura 13. Vista frontal del *túnel en las cercanías del tercer punto* para la instalación de la estación hidrológica.



Figura 14. Vista del Río Telire desde las cercanías del túnel.

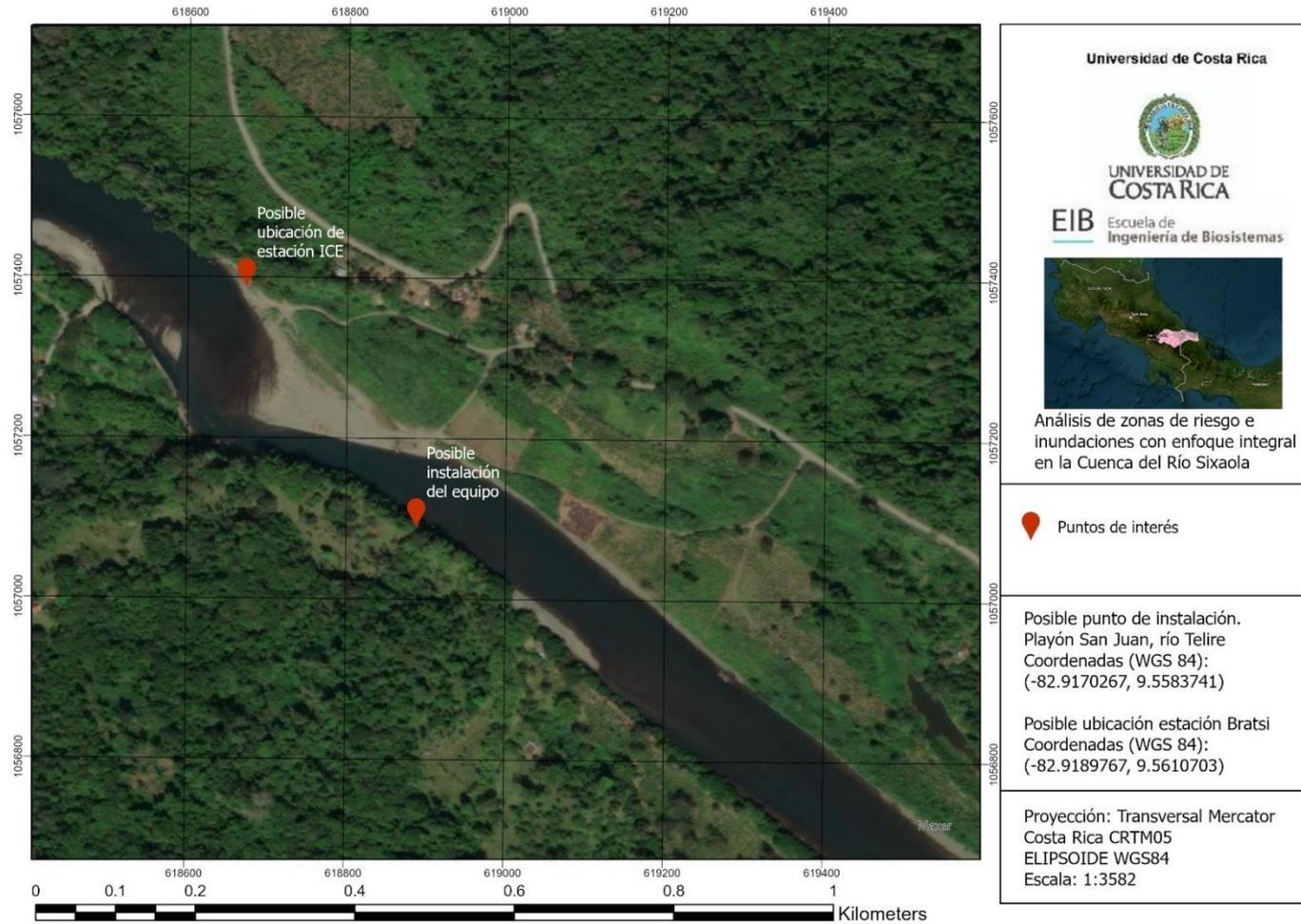


Figura 15. Primer punto de interés para instalación del equipo. Playón San Juan, río Telire.



Figura 16. Segundo punto de interés para instalación del equipo. Puerto Suretka, río Telire.



Figura 17. Tercer punto de interés para instalación del equipo. Puente sobre ruta nacional terciaria 801, Bribri-Shiroles.

8.2 Anexo 2: Parámetros para tiempos de concentración y de retardo

Tabla A1. Parámetros para cálculos de tiempos de concentración y de retardo según el tipo flujo

Subcuenca	Flujo	Longitud (m)	Elevación inicial del tramo (m)	Elevación final del tramo (m)	Pendiente del tramo (m)	n de manning	Ancho (m)	Altura del canal (m)	Z (pendiente sección transversal)
LFP Telire 1	Concentrado	2017,65	2931	2178	0,37	-	-	-	-
	En canales	67579,21	2178	201	0,03	0,055	33,36	5	0,5
LFP Telire 2	Concentrado	961,22	951	417	0,56	-	-	-	-
	En canales	14192,17	417	64	0,02	0,045	33,15	3	0,5
LFP Telire 3	Concentrado	1376,79	443	116	0,24	-	-	-	-
	En canales	11133,73	116	54	0,01	0,045	35,04	3	0,5
LFP Telire 4	Concentrado	1480,00	319	253	0,04	-	-	-	-
	En canales	5983,21	253	51	0,03	0,045	15,00	2	0,5
LFP Telire 5	Concentrado	3303,35	688	136	0,17	-	-	-	-
	En canales	7245,86	136	87	0,01	0,045	11,87	2	0,5
LFP Uren	Concentrado	1999,04	3066	2787	0,14	-	-	-	-
	En canales	37984,90	2787	111	0,07	0,045	30,51	3	0,5
LFP Uren 1	Concentrado	1274,45	1170	970	0,16	-	-	-	-
	En canales	12067,02	970	79	0,07	0,045	14,94	2	0,5
LFP Uren 2	Concentrado	-	-	-	-	-	-	-	-
	En canales	11942,20	111	48	0,01	0,045	45,19	3	0,5
LFP Coen	Concentrado	2143,34	3066	2353	0,33	-	-	-	-
	En canales	50460,64	2353	197	0,04	0,045	25,66	3	0,5
LFP Coen 2	Concentrado	1721,87	1086	530	0,32	-	-	-	-
	En canales	12478,57	530	87	0,04	0,045	7,44	2	0,5

LFP Coen bajo	Concentrado	1027,00	775	414	0,00	-	-	-	-
	En canales	10906,54	414	90	0,03	0,045	28,07	3	0,5
LFP Lari	Concentrado	1664,56	3241	1954	0,77	-	-	-	-
	En canales	44289,64	1954	134	0,04	0,045	30,29	3	0,5
LFP Yorkin 1	Concentrado	1187,67	1445	996	0,38	-	-	-	-
	En canales	22969,93	996	83	0,04	0,045	10,53	2	0,5
Subcuenca	Flujo	Longitud (m)	Elevación inicial del tramo (m)	Elevación final del tramo (m)	Pendiente del tramo (m)	n de manning	Ancho (m)	Altura del canal (m)	Z (pendiente sección transversal)
LFP Yorkin 2	Concentrado	650,43	706	272	0,67	-	-	-	-
	En canales	17737,6	272	183	0,01	0,045	16,35	2	0,5
LFP Yorkin 3	Concentrado	1157,24	1417	841	0,50	-	-	-	-
	En canales	18611,48	841	94	0,04	0,045	22,84	3	0,5
LFP Yorkin 4	Concentrado	655,18	1404	353	1,60	-	-	-	-
	En canales	19985,46	353	45	0,02	0,045	36,03	3	0,5
LFP Q Shcui	Concentrado	770,47	999	500	0,65	-	-	-	-
	En canales	9761,50	500	138	0,04	0,045	6,30	2	0,5
LFP Q Jamey	Concentrado	1630,23	581	404	0,11	-	-	-	-
	En canales	7288,44	404	156	0,03	0,045	9,30	2	0,5
LFP Inter Valle	Concentrado	662,22	236	47	0,29	-	-	-	-
	En canales	7455,38	47	43	0,00	0,045	75,4	5	0,5
LFP- TA Inter Valle 1	Concentrado	-	-	-	-	-	-	-	-
	En canales	12543,72	138	48	0,01	0,045	37,07	5	0,5
LFP Sixaola 1	Concentrado	1000,00	170	90	0,08	-	-	-	-
	En canales	26095,16	90	5	0,0033	0,045	25,00	3	0,5
LFP- TA Sixaola 2	Concentrado	1526,00	140	13	0,08	-	-	-	-

	En canales	12123,14	13	5	0,0007	0,045	96,44	8	0,5
LFP- TA Sixaola 3	Concentrado	-	-	-	-	-	-	-	-
	En canales	33028,54	21	5	0,0005	0,045	108,33	10	0,5
LFP Sixaola 4	Concentrado	3054,50	785	201	0,1912	-	-	-	-
	En canales	21215,30	201	10	0,0090	0,045	25,00	3	0,5
LFP- TA Sixaola 5	Concentrado	2434,40	423	150	0,1121	-	-	-	-
	En canales	24186,13	150	19	0,0054	0,045	85,94	10	0,5

Tabla A2. Cálculos de tiempos de concentración y de retardo según el tipo flujo para cada una de las subcuencas.

Subcuenca	Flujo concentrado			Flujo concentrado			
	Velocidad del flujo en el tramo (Ft/s)	Velocidad del flujo en el tramo (m/s)	Tiempo (s)	Tiempo (h)	Rh	V (m/s)	Tiempo (h)
LFP Telire 1	9,86	3,01	671,41	0,19	-	-	-
	-	-	-	-	4,03	7,87	2,39
LFP Telire 2	12,03	3,67	262,17	0,07	-	-	-
	-	-	-	-	2,61	6,64	0,59
LFP Telire 3	7,86	2,40	574,31	0,16	-	-	-
	-	-	-	-	2,63	3,16	0,98
LFP Telire 4	3,41	1,04	1424,75	0,40	-	-	-
	-	-	-	-	1,64	5,69	0,29
LFP Telire 5	6,60	2,01	1642,78	0,46	-	-	-
	-	-	-	-	1,58	2,47	0,81
LFP Uren	6,03	1,84	1087,80	0,30	-	-	-
	-	-	-	-	2,58	11,10	0,95

LFP Uren 1	6,39	1,95	654,01	0,18	-	-	-
	-	-	-	-	1,64	8,41	0,40
LFP Uren 2	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	2,70	3,13	1,06
LFP Coen	9,31	2,84	755,46	0,21	-	-	-
	-	-	-	-	2,52	8,50	1,65
LFP Coen 2	9,17	2,80	616,00	0,17	-	-	-
	-	-	-	-	1,42	5,28	0,66
LFP Coen bajo	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	2,55	7,15	0,42
LFP Lari	14,19	4,33	384,84	0,11	-	-	-
	-	-	-	-	2,58	8,47	1,45
LFP Yorkin 1	9,92	3,02	392,68	0,11	-	-	-
	-	-	-	-	1,54	5,90	1,08
LFP Yorkin 2	13,18	4,02	161,87	0,04	-	-	-
	-	-	-	-	1,67	2,21	2,23
LFP Yorkin 3	11,38	3,47	333,46	0,09	-	-	-
	-	-	-	-	2,47	8,14	0,64
LFP Yorkin 4	20,44	6,23	105,16	0,03	-	-	-
	-	-	-	-	2,63	5,26	1,05
LFP Q Shcui	12,98	3,96	194,62	0,05	-	-	-
	-	-	-	-	1,36	5,24	0,52
LFP Q Jamey	5,32	1,62	1005,78	0,28	-	-	-
	-	-	-	-	1,50	5,36	0,38
LFP Inter Valle	8,62	2,63	251,99	0,07	-	-	-
	-	-	-	-	4,50	1,40	1,48
LFP- TA Inter Valle 1	-	-	-	-	-	-	-

	-	-	-	-	4,10	4,82	0,72
LFP Sixaola 1	4,56	1,39	718,74	0,20	-	-	-
	-	-	-	-	2,51	2,34	3,10
LFP- TA Sixaola 2	4,65	1,42	1075,35	0,30	-	-	-
	-	-	-	-	7,03	2,09	1,61
LFP- TA Sixaola 3	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	8,67	2,06	4,44
LFP Sixaola 4	7,05	2,15	1420,11	0,39	-	-	-
	-	-	-	-	2,51	3,89	1,51
LFP- TA Sixaola 5	5,40	1,65	1477,83	0,41	-	-	-
	-	-	-	-	8,40	6,76	0,99

8.3 Anexo: Láminas máximas de precipitación para diferentes duraciones y periodos de retorno

Tabla A1. Láminas de precipitación para diferentes periodos de retorno y duraciones, para la subcuenca Yorkin 3, datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.

Láminas de lluvia (mm)						
Duración (h)	T2	T5	T10	T25	T50	T100
1	41,10	59,75	72,09	87,69	99,26	110,74
2	58,13	82,74	99,04	119,63	134,90	150,07
3	69,74	101,89	123,18	150,08	170,04	189,84
6	86,54	123,92	148,67	179,93	203,13	226,15
12	104,22	143,42	169,37	202,16	226,49	250,64
24	134,34	180,19	210,54	248,89	277,35	305,59

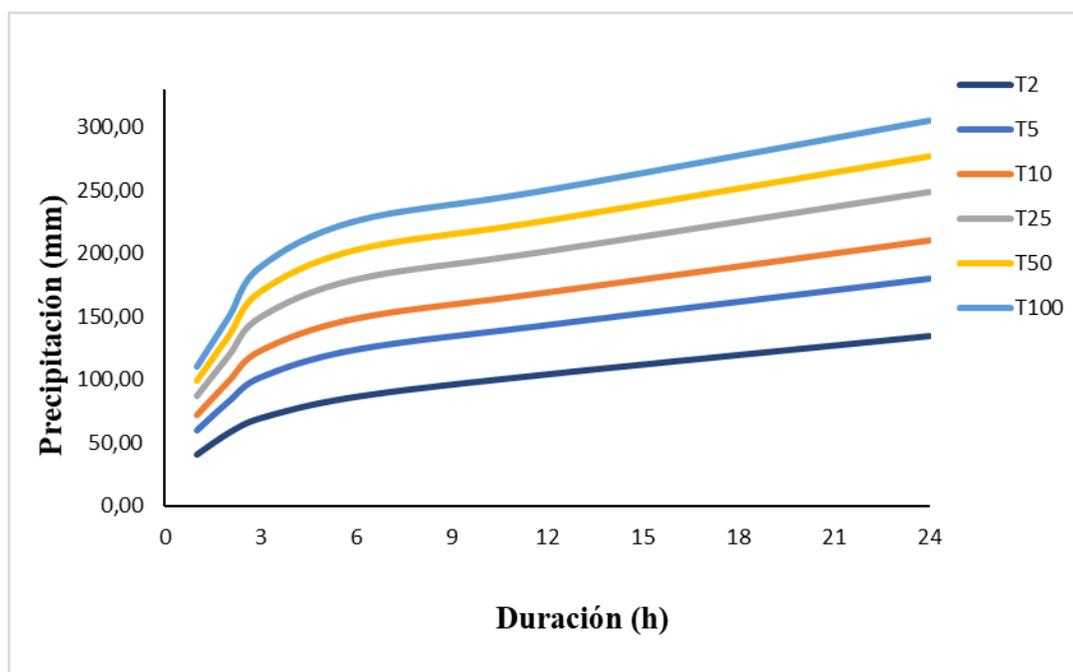


Figura A1. Curvas de lámina de precipitación, duración y frecuencia para la subcuenca Yorkin 3 del Río Sixaola de datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.

Tabla A2. Láminas de precipitación para diferentes periodos de retorno y duraciones, para la Estación Gavilán Canta, datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.

Láminas de lluvia (mm)						
Duración (h)	T2	T5	T10	T25	T50	T100
1	45,32	69,30	85,17	105,23	120,11	134,88
2	62,86	96,03	118,00	145,74	166,33	186,76
3	76,00	115,38	141,45	174,39	198,83	223,09
6	96,06	141,00	170,76	208,35	236,24	263,93
12	113,73	161,41	192,97	232,86	262,45	291,82
24	145,25	190,52	220,49	258,36	286,46	314,35

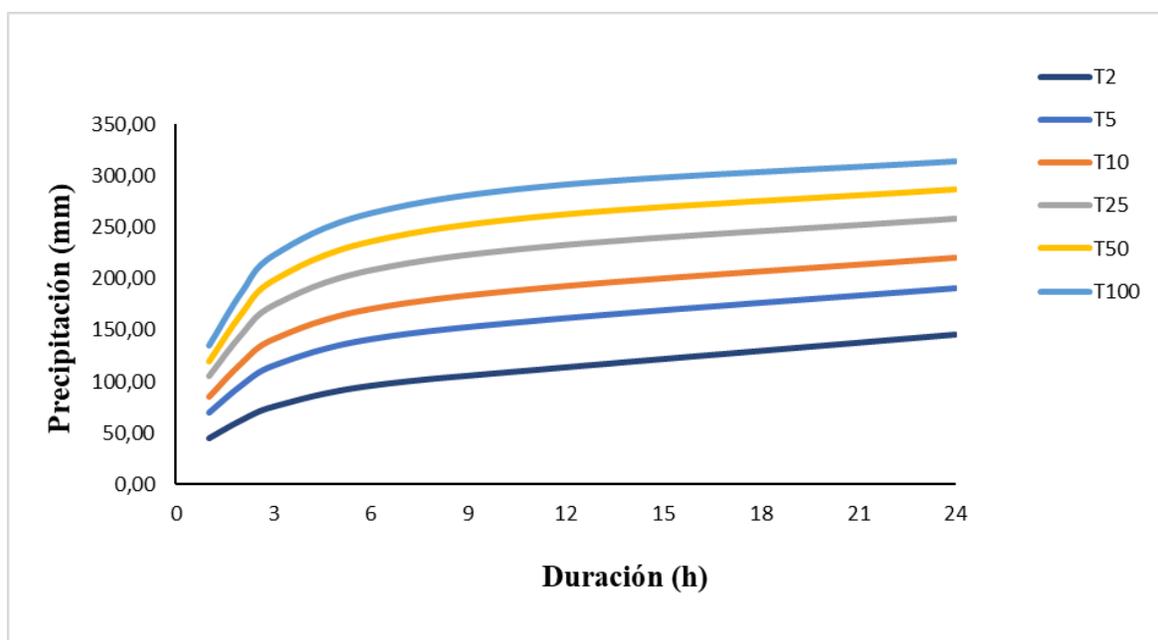


Figura A2. Curvas de lámina de precipitación, duración y frecuencia para la ubicación de la Estación Gavilán Canta, datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.

Tabla A3. Láminas de precipitación para diferentes periodos de retorno y duraciones, ubicación de la Estación Sepecue-Telire

Láminas de lluvia (mm)						
Duración (h)	T2	T5	T10	T25	T50	T100
1	46,04	71,41	88,20	109,42	125,16	140,78
2	65,44	97,57	118,84	145,72	165,66	185,45
3	76,17	111,81	135,40	165,21	187,33	209,28
6	95,81	134,55	160,20	192,61	216,66	240,52
12	112,00	152,23	178,86	212,51	237,47	262,25
24	136,86	179,67	208,01	243,82	270,39	296,76

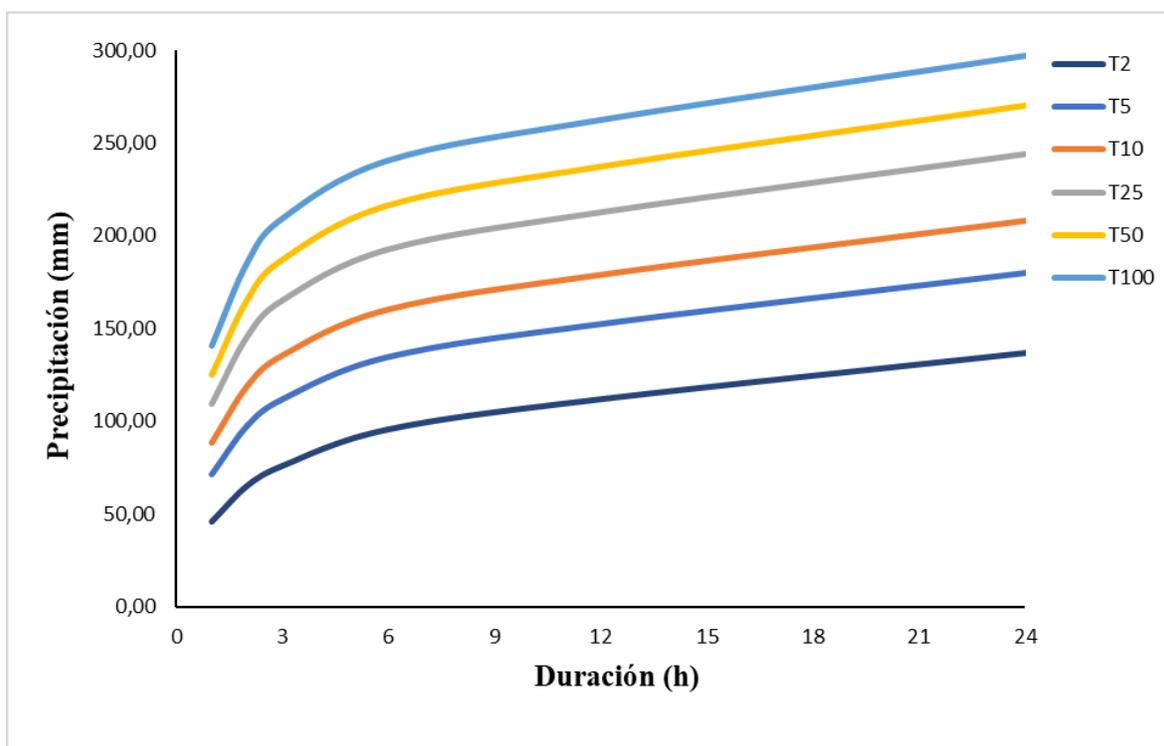


Figura A3. Curvas de lámina de precipitación, duración y frecuencia para la ubicación de la Estación Sepecue-Telire datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.

Tabla A4. Láminas de precipitación para diferentes periodos de retorno y duraciones, para la subcuenca Yorkin 1.

Láminas de lluvia (mm)						
Duración (h)	T2	T5	T10	T25	T50	T100
1	33,96	42,36	47,92	54,94	60,15	65,32
2	50,50	66,53	77,15	90,56	100,52	110,40
3	62,19	80,58	92,76	108,15	119,57	130,90
6	77,71	102,45	118,83	139,53	154,88	170,12
12	95,43	135,33	161,76	195,14	219,90	244,48
24	117,95	165,59	197,14	237,00	266,57	295,92

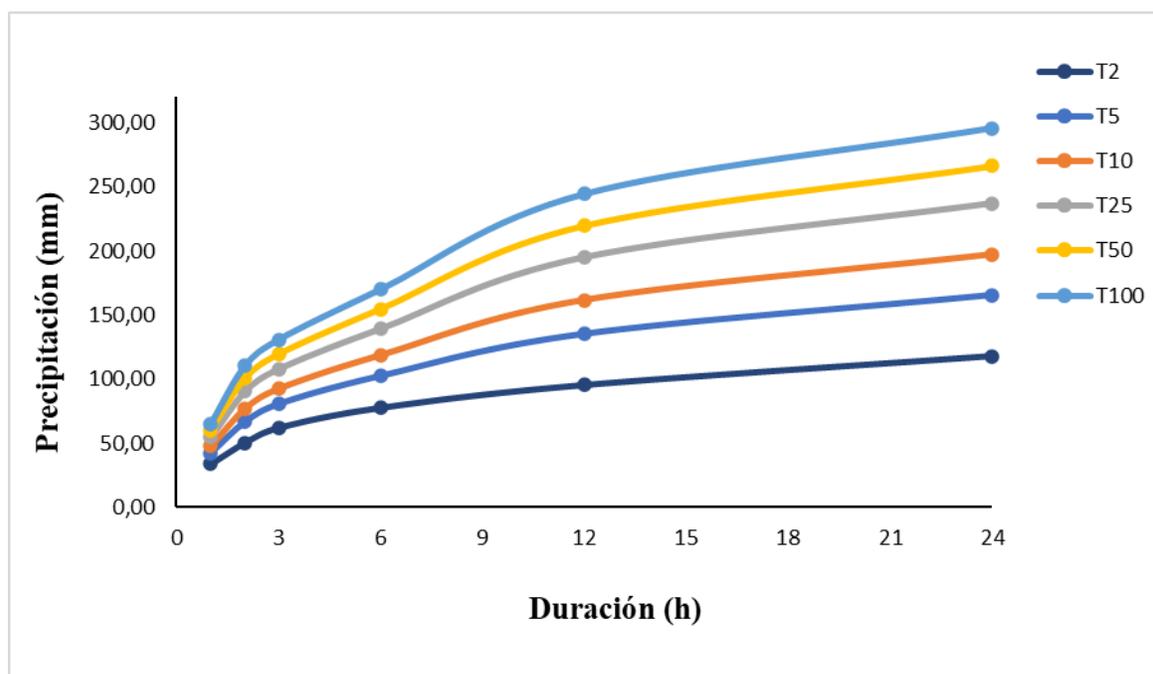


Figura A4. Curvas de lámina de precipitación, duración y frecuencia para la subcuenca Yorkin 1 del Río Sixaola de datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.

Tabla A5. Láminas de precipitación para diferentes periodos de retorno y duraciones, para la subcuenca Yorkin 4

Láminas de lluvia (mm)						
Duración (h)	T2	T5	T10	T25	T50	T100
1	45,41	72,41	90,28	112,86	129,62	146,24
2	61,27	97,81	121,99	152,55	175,23	197,73
3	71,92	114,04	141,93	177,17	203,31	229,26
6	92,74	143,18	176,58	218,77	250,08	281,15
12	112,10	163,76	197,97	241,19	273,26	305,09
24	144,37	198,46	234,27	279,52	313,08	346,40

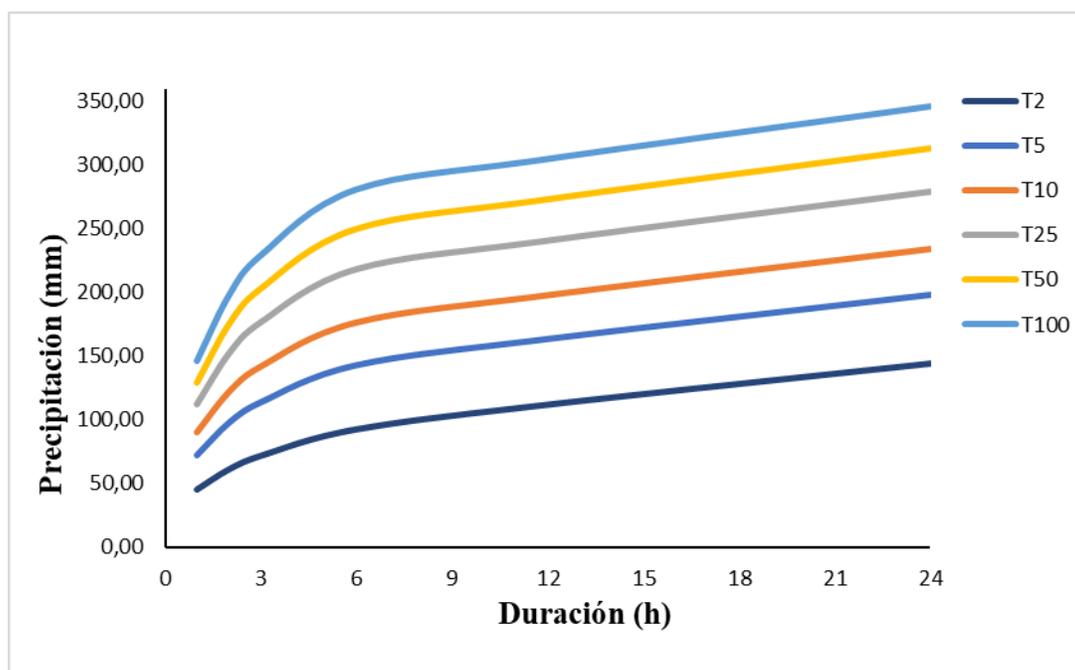


Figura A5. Curvas de lámina de precipitación, duración y frecuencia para la subcuenca Yorkin 4 del Río Sixaola de datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.

Tabla A6. Láminas de precipitación para diferentes periodos de retorno y duraciones, ubicación de la Estación Sixaola

Láminas de lluvia (mm)						
Duración (h)	T2	T5	T10	T25	T50	T100
1	40,88	53,95	62,61	73,54	81,65	89,71
2	58,58	76,50	88,37	103,36	114,49	125,53
3	72,38	97,08	113,43	134,09	149,42	164,64
6	93,84	123,07	142,42	166,87	185,02	203,02
12	112,52	148,73	172,70	202,98	225,45	247,75
24	138,58	186,50	218,22	258,31	288,04	317,56

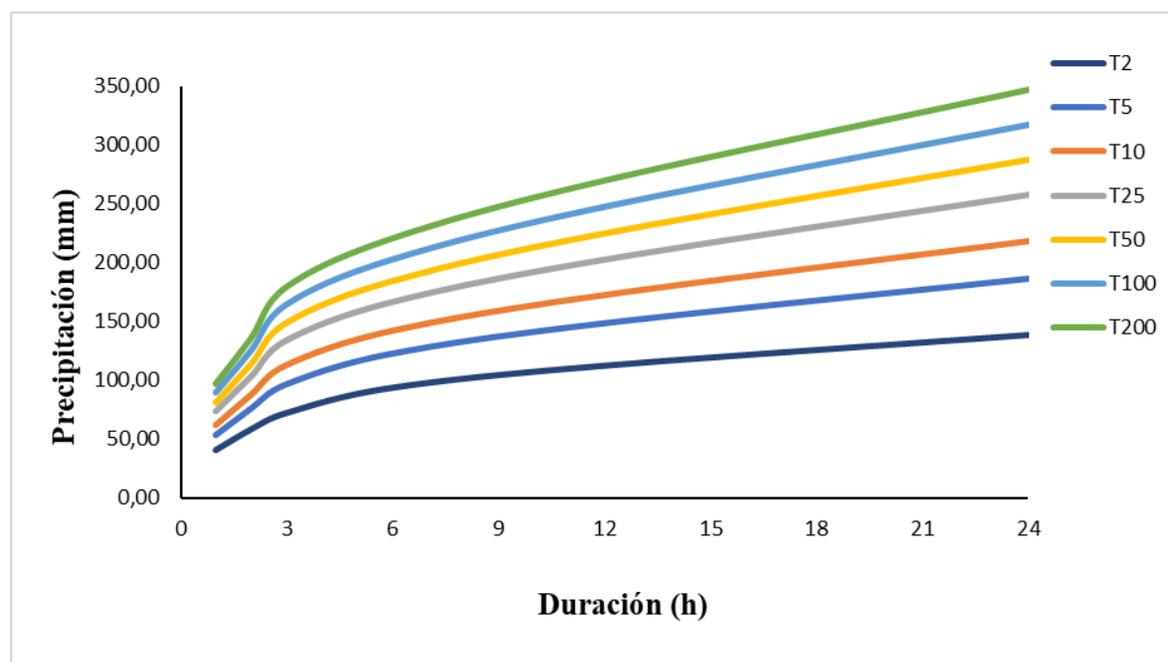


Figura A6. Curvas de lámina de precipitación, duración y frecuencia para la ubicación de la Estación Sixaola datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.

Tabla A7. Láminas de precipitación para diferentes periodos de retorno y duraciones, para la subcuenca Sixaola1.

Láminas de lluvia (mm)						
Duración (h)	T2	T5	T10	T25	T50	T100
1	40,59	62,90	77,68	96,34	110,19	123,93
2	62,02	88,14	105,43	127,28	143,49	159,58
3	76,06	109,13	131,03	158,69	179,22	199,59
6	98,58	133,93	157,33	186,90	208,84	230,61
12	116,04	153,14	177,71	208,75	231,77	254,63
24	141,43	186,64	216,58	254,40	282,46	310,31

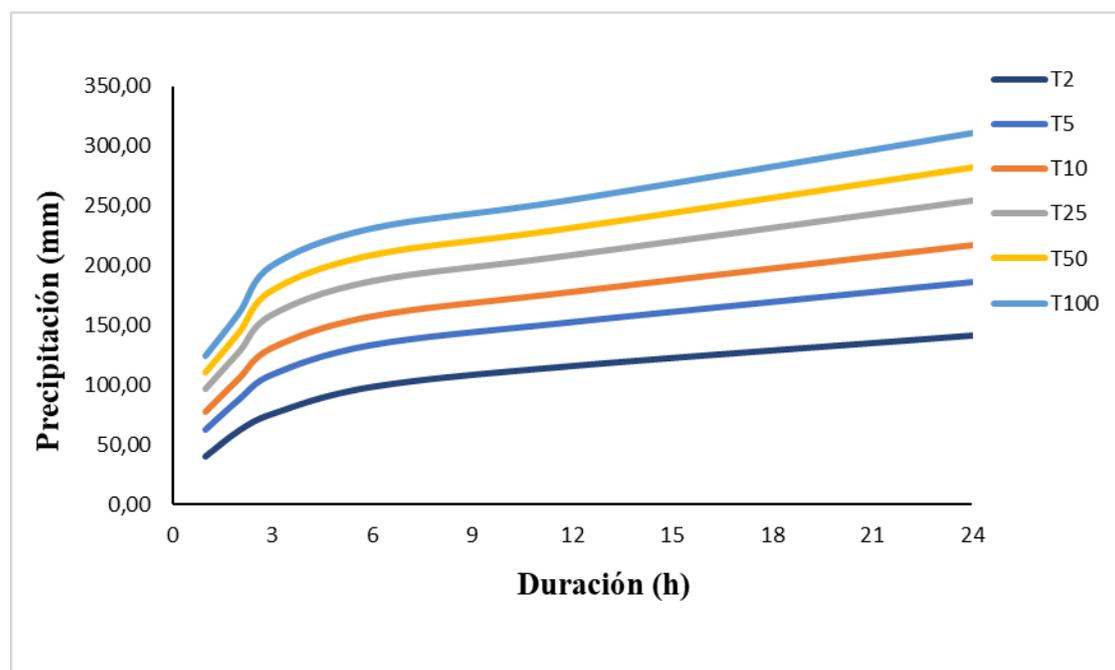


Figura A7. Curvas de lámina de precipitación, duración y frecuencia para la subcuenca Sixaola 1 del Río Sixaola de datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.

Tabla A8. Láminas de precipitación para diferentes periodos de retorno y duraciones, para la subcuenca Sixaola 5.

Láminas de lluvia (mm)						
Duración (h)	T2	T5	T10	T25	T50	T100
1	43,84	65,64	80,08	98,31	111,84	125,27
2	62,14	90,72	109,64	133,54	151,27	168,87
3	73,04	104,36	125,10	151,30	170,73	190,03
6	93,15	127,65	150,50	179,36	200,77	222,03
12	108,41	147,53	173,44	206,16	230,44	254,54
24	137,61	186,65	219,13	260,16	290,60	320,81

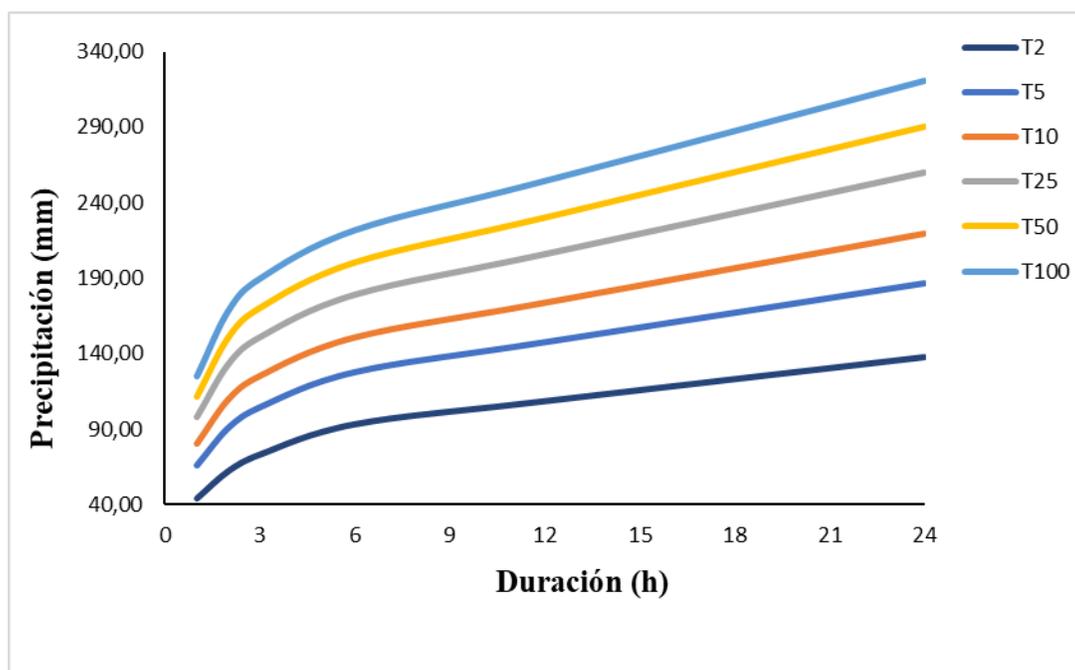


Figura A8. Curvas de lámina de precipitación, duración y frecuencia para la subcuenca Sixaola 5 del Río Sixaola de datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.

Tabla A9. Láminas de precipitación para diferentes periodos de retorno y duraciones, para la subcuenca Sixaola 5.

Láminas de lluvia (mm)						
Duración (h)	T2	T5	T10	T25	T50	T100
1	47,85	69,20	83,34	101,20	114,46	127,61
2	64,20	93,11	112,26	136,44	154,38	172,19
3	74,93	108,53	130,77	158,88	179,73	200,43
6	95,88	137,71	165,41	200,41	226,37	252,14
12	113,99	158,66	188,23	225,60	253,32	280,84
24	145,24	193,81	225,97	266,61	296,75	326,68

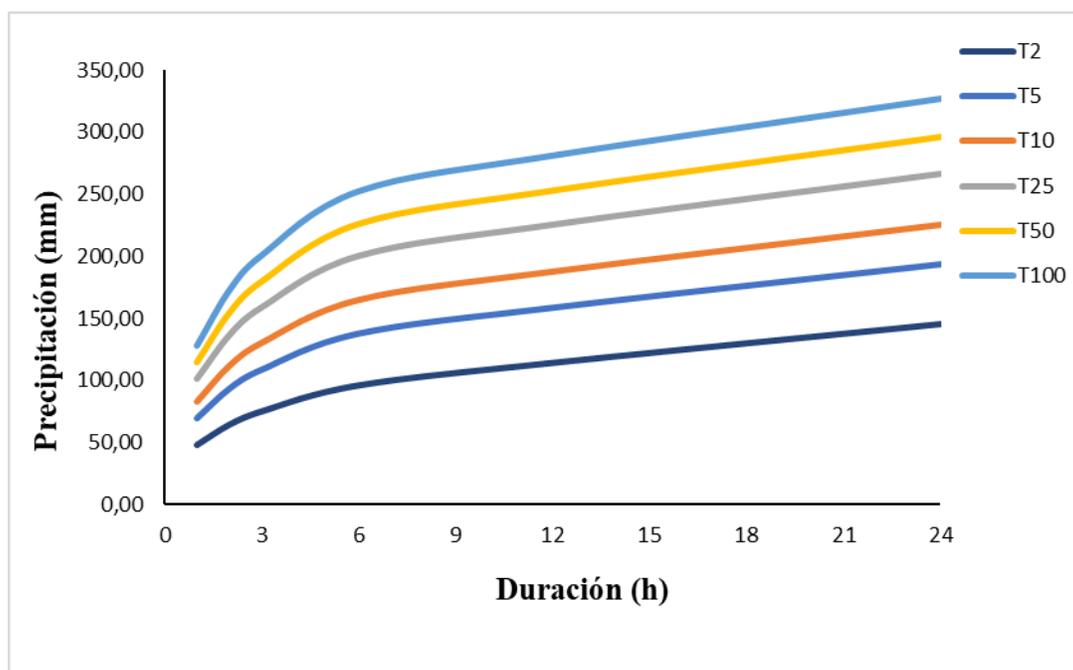


Figura A9. Curvas de lámina de precipitación, duración y frecuencia para la subcuenca Yorkin 2 del Río Sixaola de datos de precipitación de PERSIANN-DIR Now.