



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Modelación hidrodinámica del río Las Palmas y un trayecto del
río Tempisque para determinar áreas de afectación en eventos
extremos, permitiendo visualizar su influencia sobre la red de
canales del proyecto Paacume.

Yasser Luis Espinoza Rivera

CARTAGO, 2018

Modelación hidrodinámica del río Las Palmas y un trayecto del río Tempisque para determinar áreas de afectación en eventos extremos, permitiendo visualizar su influencia sobre la red de canales del proyecto Paacume.

Yasser Luis Espinoza

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Fernando Watson Hernández

Asesor

Marvin Villalobos Araya

Director Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2018

Dedicatoria

Como estudiante de origen nicaragüense, quiero dedicar este trabajo a los estudiantes de mi tierra que vieron truncados sus sueños en el marco de las protestas iniciadas el 18 de abril del 2018.

Agradecimientos

Quiero agradecer primero a Dios por darme salud y sabiduría para culminar esta etapa de mi vida, a Ana Ruth Sánchez y Martín Eduardo Aguilar quienes me acogieron en su hogar como un hijo, a mi mamá María Urania Rivera por enseñarme a ganarme la vida honradamente, a los profesores y personal de apoyo de la Escuela de Ingeniería Agrícola por hacer de esto una experiencia muy enriquecedora y todas las personas que de alguna manera me apoyaron durante este proceso.

Índice de contenidos

Índice

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos	ii
Índice de contenidos	iii
Índice de figuras.....	vi
Indice de cuadros	x
1 Resumen.....	1
2 Abstract	3
3 Introducción.....	5
4 Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos.....	7
5. Revisión bibliográfica.....	8
5.1. Importancia del proyecto para Guanacaste y para el país	10
5.2. Antecedentes.....	13
5.3. Uso de suelos e hidrología.....	14
5.4. Caracterización de las cuencas	16
5.5. Modelos hidráulicos	17
5.6. Validación de resultados.....	18
6 Metodología.....	20
6.1 Recursos usados.....	21
6.2 Topografía	21
6.3 Delimitación de la cuenca del río Las Palmas y su cobertura.	21
6.4 Comparación de las precipitaciones generadas por la tormenta Nate contra las precipitaciones generadas por otros eventos.	22

6.5	Determinación de hidrogramas del río Tempisque y las microcuencas del río Las Palmas.....	23
6.6	Cálculo de precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno.....	26
6.7	Modelación hidráulica	27
6.8	Validación de resultados.....	27
7	Resultados y análisis de resultados	28
7.1	Delimitación de las cuencas y caracterización de las cuencas	29
7.1.1	Las Palmas	29
7.1.2	Río Tempisque.....	33
7.2	Áreas de influencias.....	36
7.3	Análisis hidrológico.....	37
7.3.1	Modelo hidrológico de la cuenca del río Las Palmas	41
7.3.2	Modelo matemático de la cuenca del río Tempisque.....	46
7.4	Modelo hidrodinámico	48
7.4.1	Limitaciones.....	48
7.4.2	Geometría base	48
7.4.3	Asignación de uso coeficiente de rugosidad de Manning.....	49
7.4.4	Tamaño de mallado.....	50
7.4.5	Asignación de elevaciones.....	50
7.4.6	Resultados del modelo hidrodinámico.....	50
7.4.7	Causa principal de las inundaciones generadas por Nate	55
7.5	Validación de resultados.....	57
7.5.1	Comparación de manchas de inundación.....	58
7.5.2	Comparación de niveles en diferentes puntos.....	60
8	Conclusiones	66

9	Recomendaciones	68
10	Bibliografía	69
11	Anexo.....	71
11.1	Anexo 1. Cortes transversales de los ríos Las Palmas y Tempisque.....	72
11.2	Anexo 2. Hidrogramas usados en la modelación hidrodinámica.	76

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica de las cuencas de los ríos Las Palmas y Tempisque.	9
Figura 2. Clasificación de cuencas, según su curva hipsométrica.	16
Figura 3. Ubicación de estaciones.	23
Figura 4. Hidrograma para evaluar un tramo de un kilómetro del río Tempisque.	25
Figura 5. Cuenca del río Las Palmas y sus altitudes.	30
Figura 6. Pendientes de la cuenca del río Las Palmas y ubicación de las microcuencas de los ríos Belén, San Blas y Sardinal.	31
Figura 7. Curva hipsométrica y curva de frecuencia de altitudes.	32
Figura 8. Acumulación de sedimentos en el cauce del río Las Palmas.	32
Figura 9. Acumulación de basura en el cauce del río Las Palmas.	33
Figura 10. Mapa de altitudes de la margen izquierda del río Tempisque.	34
Figura 11. Vecina de la comunidad de La Guinea limpiando el acceso a su hogar después de la crecida originada por el huracán Mitch.	35
Figura 12. Calle en La Guinea durante la tormenta Nate.	36
Figura 13. Ruta de modelación del río Las Palmas y Tempisque.	37
Figura 14. Precipitaciones anuales.	38
Figura 15. Precipitaciones máximas diarias de los últimos 19 años.	39
Figura 16. Hietogramas registrados en las estaciones de La Guinea y Aeropuerto Liberia durante la Tormenta Nate.	41
Figura 17. Polígono de Thiessen de la cuenca del río Las Palmas.	42
Figura 18. Número de curva de la cuenca del río Las Palmas.	43
Figura 19. Microcuencas de los ríos Sardinal, San Blas y Cuenca Alta del río Las Palmas.	44
Figura 20. Hidrogramas del río Sardinal y Cuenca Alta del río Las Palmas.	45
Figura 21. Hidrograma del río San Blas durante la tormenta Nate.	45
Figura 22. Hidrograma que generó la tormenta Nate en el río Tempisque.	47
Figura 23. Base geométrica para la modelación.	49
Figura 24. Asignación del número de Manning para los diferentes tipos de cobertura.	49
Figura 25. Distribución del mallado.	50
Figura 26. Tirantes máximos generados con el modelo hidrodinámico.	51
Figura 27. Velocidades máximas generadas con el modelo hidrodinámico.	52

Figura 28. Secciones de la red de canales del proyecto Paacume y manchas de inundación generadas con el modelo hidrodinámico.	53
Figura 29. Trazos con que se elaboraron los perfiles.	54
Figura 30. Perfil 1.	54
Figura 31. Perfil 2.	55
Figura 32. Tramo donde el río Tempisque se desbordo.....	56
Figura 33. Ubicación de secciones transversales realizadas con el modelo hidrodinámico.	57
Figura 35. Comportamiento del río Tempisque a la altura de Filadelfia.	58
Figura 36. Comportamiento del río Tempisque a la altura de Filadelfia.	59
Figura 37. Manchas de inundación aguas abajo de la Ruta 21.	59
Figura 38. Barrio Bambú durante la tormenta Nate y manchas de inundación generadas con el modelo hidrodinámico.	60
Figura 39. Puntos de referencia para validad niveles.	61
Figura 40. Tronco sobre las ramas de un árbol en el cauce del río Las Palmas.	61
Figura 41. Evolución del tirante en las coordenadas donde estaba ubicado el tronco....	62
Figura 42. Nivel máximo que alcanzo el agua en el interior de la casa de habitación de la persona de la foto.....	63
Figura 43. Evolución del tirante en las coordenadas donde está ubicada la casa usada como referencia en el barrio Bambú.....	63
Figura 44. Marcas hasta donde llego el agua durante la tormenta Nate.	64
Figura 45. Evolución del tirante en la casa usada como referencia cerca de la melonera.	65
Figura 46. Sección transversal río La Palmas número 1.....	72
Figura 47. Sección Transversal río Las Palmas número 2.....	72
Figura 48. Sección Transversal río Las Palmas número 3.....	73
Figura 49. Sección transversal río Las Palmas número 4.	73
Figura 50. Sección transversal río Las Palmas número 5.	74
Figura 51. Sección transversal río Tempisque número 6.....	74
Figura 52. Sección transversal río Tempisque número 7.....	75
Figura 53. Sección transversal río Tempisque número 8.....	75

Figura 54. Sección transversal río Tempisque número 9..... 76

Indice de cuadros

Cuadro 1. Distritos y su respectiva cantidad de habitantes por donde pasara la red de canales del proyecto Paacume.	12
Cuadro 2. Porcentaje de personas pobres según región.	12
Cuadro 3. Altura de precipitación acumulada para diferentes días consecutivos.	39
Cuadro 4. Precipitación para diferentes periodos de retorno, con una duración de 2 días.	40
Cuadro 5. Tiempos de concentración.....	41
Cuadro 6. Datos de entrada para elaborar el modelo hidrológico.....	44
Cuadro 7. Caudales picos generados durante la tormenta Nate.....	46

1 Resumen

En este proyecto se analizó el comportamiento hidrodinámico del río Las Palmas y un trayecto del río Tempisque en la provincia de Guanacaste, ya que es de interés para el Senara contar con un estudio técnico, donde se demuestre el impacto de las inundaciones ocasionadas por el desbordamiento de los ríos antes mencionados y así determinar que secciones de la red de canales del proyecto Paacume podrían ser afectadas.

Como principal escenario se planteó recrear las manchas de inundación que generó la tormenta Nate, que afectó al país los días 4 y 5 de octubre del 2017; para esto fue necesario recolectar información que se registró durante la tormenta.

Se realizó un modelo matemático para generar de forma indirecta la ecuación que relaciona tirante con caudal y así elaborar el hidrograma que originó la tormenta en el río Tempisque. Los hidrogramas de los afluentes del río Las Palmas se obtuvieron a partir de los registros de las estaciones meteorológicas ubicadas en La Guinea, Aeropuerto Liberia y El Corral. Como método de pérdidas se usó el método de Número de Curva y para transformación de precipitaciones a caudales se usó el método de Hidrograma Unitario, ambos métodos desarrollados por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS).

El modelo hidrodinámico se realizó con el programa Iber 2.3.2 y de las pruebas realizadas se obtuvo que para una condición hidrológica 2 (CHA 2), el comportamiento de las manchas de inundación y sus niveles eran similares a los registrados durante la tormenta, por lo que en este documento solo se analizaron los resultados del modelo hidrodinámico.

2 Abstract

This study analyzed Las Palmas river's hydrodynamic behavior, and also a section of the Tempisque river in Guanacaste - which is one of the provinces of Costa Rica- because the value of this technical study helps Senara to show the impact of the floods caused by the overflowing of the aforementioned rivers. As a result, this analysis can determine what sections of the Paacume project waterways could be affected.

Based on the collected data from Tropical storm Nate, the outlined scenario was to recreate the spots of the flood caused by Tropical Storm which affected Costa Rica in October 4th and 5th, 2017.

The registered data pertained only to the levels Tempisque river reached in the bridge located in the community of Guardia; therefore, a math model was implemented in order to obtain the hydrograph that the storm could produce. Las Palmas river's tributaries hydrographs were based on the data from the weather stations located in La Guinea, Liberia Airport, and El Corral. The runoff curve number was the parameter used for this study.

The hydrodynamic model was carried out in Iber 2.3.2, and after testing, the outcome was that a hydrologic condition (CHA 2) showed that the behavior of the flood spots and its levels were similar to the ones registered during the tropical storm; hence, this work will emphasize the hydrodynamic model achieved from a hydrologic condition.

3 Introducción

El agua es el recurso máspreciado, que juega un papel imprescindible en el desarrollo de toda actividad humana. Sin embargo, los fenómenos climáticos como consecuencia en gran medida del accionar del hombre, aunado a las características propias de la topografía de una región equis, provoca condiciones que al conjugarse afectan en gran medida dichas actividades (Soto, 2014).

La tormenta Nate que afecto el pacífico norte de nuestro país en octubre del 2017, provocando severas inundaciones principalmente en el sector de Filadelfia Guanacaste, dejando como resultado pérdidas humanas, de infraestructura y económicas calculadas en \$ 385 millones, principalmente en el sector agropecuario de la zona, siendo esta ya de por si una población que debido a largas sequías sufre efectos en su productividad (Rodríguez, 2018).

La búsqueda de soluciones viables que mitiguen los efectos climáticos y se haga un aprovechamiento adecuado del recurso hídrico en beneficio de sus pobladores, forma parte del quehacer de Senara a nivel nacional, motivo por el cual surge la inquietud por crear un modelo de canales de riego derivados de las aguas provenientes del embalse del lago Arenal, que favorezca la adecuada distribución de este recurso.

Como parte del diseño del proyecto, se deben contemplar escenarios de eventos extremos, por lo que se hace necesario crear un modelo hidrodinámico que demuestre claramente y con certeza de acuerdo con datos históricos y trabajo de campo las características hidrológicas, topográficas e hidráulicas que presenta la zona, para así determinar las posibles consecuencias que ocasionaría un evento climático similar a Nate sobre la red de canales del proyecto Paacume.

4 Objetivos

4.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento del río Las Palmas y un trayecto del río Tempisque, mediante un modelo hidráulico bidimensional, que permita identificar las manchas de inundación que generan estos ríos, lo que servirá de sustento para la futura planificación de obras de protección a la red de canales del proyecto Paacume.

4.2. Objetivos específicos

1. Determinar la respuesta hidrológica de las cuencas de los ríos Las Palmas y Tempisque producto de la influencia de la tormenta Nate.
2. Determinar y validar las manchas de inundación de los ríos Las Palmas y Tempisque para el trayecto comprendido entre las comunidades de Guardia y La Guinea, por medio de un modelo bidimensional.

5. Revisión bibliográfica

Los ríos Tempisque y Las Palmas se ubican en la provincia de Guanacaste, en sus recorridos atraviesan principalmente diferentes comunidades de los cantones de Carrillo y Liberia. En el caso de las Palmas, recolecta la mayor parte de las aguas que se generan por escorrentía en el cantón de Carrillo. En la figura 1 se muestra la ubicación geográfica de las cuencas.

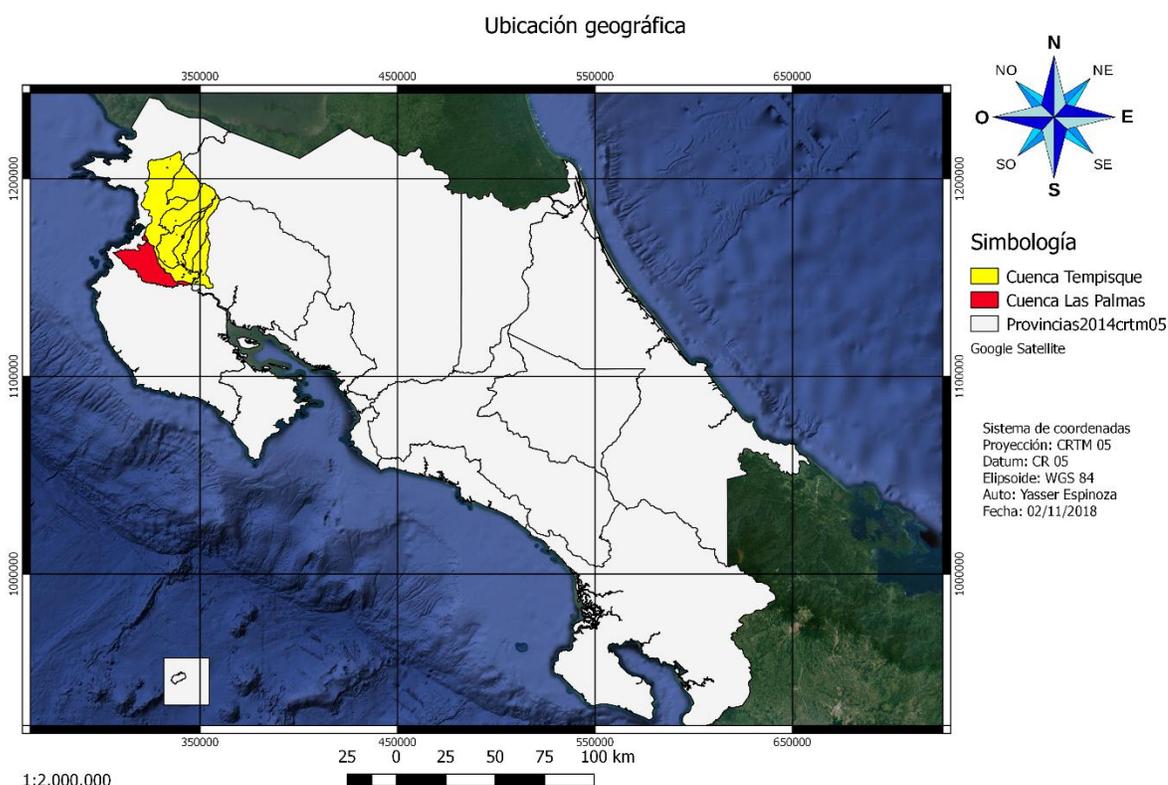


Figura 1. Ubicación geográfica de las cuencas de los ríos Las Palmas y Tempisque.

El modelo hidrodinámico desarrollado en el presente documento para los ríos, Las Palmas y Tempisque, forma parte del Programa Integral de Abastecimiento de Agua para Guanacaste (PIAAG), el cual integra una serie de proyectos y acciones estratégicas que involucran el desarrollo de infraestructura hidráulica, gestión del recurso hídrico, implementación de tecnologías novedosas, además, actividades de conservación y uso eficiente del agua, todo con el fin de mejorar el acceso al agua en la provincia de Guanacaste (Senara, 2018).

El Proyecto de abastecimiento de agua para la cuenca media del río Tempisque y comunidades costeras (Paacume), es uno de los proyectos que conforman el programa PIAAG. Acordado mediante decreto N° 39145-MP-MIDEPLAN-MINAE-MAG.

Con el proyecto Paacume se aprovecharán las aguas del embalse Arenal, para llenar el Embalse de río Piedras en Bagaces y con las aguas recolectadas se pondrán bajo riego un área aproximada de 17 mil hectáreas en los cantones de Carrillo, Santa Cruz y Nicoya; por lo que este proyecto requerirá las siguientes obras de infraestructura (SENARA, 2018).

1. Embalse -presa, Se ubicará en Bagaces y permitirá inundar 850 hectáreas, que se tendrán como reserva para abastecer con agua en verano e invierno.
2. Infraestructura para generar energía hidroeléctrica, 36 GM anuales.
3. Ampliación y mejoras al Canal Oeste, que se usara para transportar el agua del embalse a la comunidad de Palmira.
4. La red de 300 kilómetros, para conducir y distribuir el agua en los cantones de Carrillo, Santa Cruz y Nicoya.

Con las obras del proyecto Paacume se llevará un de 20 m³/s a la margen derecha del río Tempisque, para ser usado en diferentes actividades, que vendrían a contribuir al desarrollo socioeconómico de la provincia de Guanacaste. La distribución del agua se pretende hacer de la siguiente forma (Senara, 2018).

1. Para riego agropecuario 16,5 m³/s.
2. Consumo humano 2 m³/s
3. Riego en zonas turísticas 1,5 m³/s
4. Generación hidroeléctrica.

5.1. Importancia del proyecto para Guanacaste y para el país

Guanacaste en los últimos años ha tenido una reducción en la cantidad de precipitación anual, lo que ha generado que los pozos para el abastecimiento de agua potable estén llegando a niveles críticos, ya que las lluvias no dan abasto para recargar los mantos acuíferos, exponiendo a la provincia a una crisis por déficit hídrico (Arguedas O, 2015).

Los problemas económicos y sociales de la provincia de Guanacaste están muy ligados con el déficit de agua, ya que al ser una zona agropecuaria y con un importante crecimiento del turismo en los últimos 30 años han originado mayor demanda de este recurso en la zona.

En los últimos años a raíz de la reducción de las precipitaciones, el turismo en la provincia ha sido afectado, principalmente en las zonas costeras debido a la falta de agua; en publicaciones realizadas en el diario La Nación los días 24 y 25 de julio de 2017 hacen énfasis

en los problemas por el desabastecimiento de agua y los porcentajes de área dedicada a la actividad agropecuaria.

Para Priscila Solano, presidenta de la Cámara de Turismo de Guanacaste (Caturgua), el tema del agua es básico para levantar la actividad turística, que es la principal fuente de ingresos para la provincia, pues desde que se inició la emergencia de la sequía en el año 2013, no se aprueban nuevos proyectos y por ende no hay nuevos empleos.

Sin embargo, Solano asegura que la conclusión de los acueductos de Sardinal y Nimboyores, en Santa Cruz, son claves para echar a andar nuevamente la industria turística (Recio, 2017).

La provincia tiene actualmente 80 254 hectáreas en producción agrícola, un 16% del total de área dedicada por Costa Rica a esa actividad, según datos de Sepsa.

La mayor área se dedica a caña de azúcar, con 34 669 hectáreas o sea un 35% del área total del país en ese producto. En arroz, Guanacaste tiene 23 000 hectáreas lo que equivale a un 35% del total y en melón 4 776 hectáreas siendo un 72% del total.

Tiene, además, 323 000 cabezas de ganado, un cuarto del total nacional, y es la región por excelencia para cultivar tilapias (Barquero, 2013).

De acuerdo con Sepsa, el sector agropecuario guanacasteco da empleo directo actualmente a 28 277 personas. Eso lo mantiene como la principal fuente de trabajo por volumen de puestos (Barquero, 2013).

El proyecto Paacume tendría un impacto social y económico positivo en la provincia de Guanacaste, ya que permitiría habilitar nuevas áreas de siembra, desarrollar nuevos proyectos turísticos y permitirá darles descanso a los acuíferos para que estos puedan recuperarse (Senara, 2018).

Las manchas de inundación identificadas en este proyecto serán un insumo importante para elaborar obras de protección a la red de canales que conforman el proyecto Paacume, ya que con estas obras Senara garantizaría el abastecimiento de agua en la zona, y además se reduciría la posibilidad de pérdidas económicas causadas por la suspensión del servicio en caso de que los canales sean afectados por las crecidas de los ríos.

Los distritos que se beneficiaran con el proyecto Paacume se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Distritos y su respectiva cantidad de habitantes por donde pasara la red de canales del proyecto Paacume.

Cantón	Distrito	Número de habitantes en el año 2015
Santa Cruz	Bolsón	1872
	Diría	4301
	Santa Cruz	24540
	Veintisiete de Abril	75399
	Cartagena	4191
	Tempate	5428
Carrillo	Sardinal	16557
	Palmira	5578
	Belén	9455
	Filadelfia	8141
Nicoya	San Antonio	6778
Total		162240

Fuente: (INEC, 2015)

Considerando que la región Chorotega es la segunda con mayor porcentaje de pobreza en el país (ver cuadro 2), es de vital importancia garantizar la integridad de la red de canales del proyecto Paacume, ya que de este se beneficiarán de forma directa e indirecta muchas familias de la región.

Cuadro 2. Porcentaje de personas pobres según región.

Región	No Pobres	Pobres		
		Pobreza no extrema	Pobreza extrema	Total
Central	84,3	11,7	3,9	15,7
Chorotega	66,6	21,5	11,9	33,4
Pacifico Central	69,1	20,1	10,8	30,9
Brunca	66,3	20,8	13	33,7
Huetar Atlántica	73,4	16,8	9,8	26,6
Huetar Norte	77,1	14,5	8,5	22,9

Fuente: (INEC, 2015)

5.2. Antecedentes

La posición geográfica de Guanacaste hace que la provincia sea propensa a sufrir los efectos del fenómeno El niño-Oscilación del Sur (ENOS), que se manifiesta por periodos prolongados de sequía (Niño) o por el aumento de precipitaciones. El fenómeno ENOS tiene su origen con la interacción de las aguas de la superficie del océano Pacífico con la atmósfera (Soto, 2015).

Para efectos de este documento solamente se hará referencia a aquellos eventos de precipitación extraordinarios que generaron que los ríos Tempisque y Las Palmas salieran de su cauce, con especial énfasis en la crecida generada por la tormenta Nate. Esta información se extraerá de publicaciones de periódico, noticias televisivas, reportes de la Comisión Nacional de Emergencia (CNE) y entrevistas a algunos pobladores que viven en las orillas de los ríos.

Según la Comisión Nacional de Emergencias (CNE 1997), las inundaciones son el fenómeno de amenaza natural más frecuente en Costa Rica y su recurrencia está determinada en gran medida por la influencia de diversos fenómenos principalmente de orden hidrometeorológico. Este mismo órgano, cita 16 localidades en la Región Chorotega, como comunidades prioritarias bajo la influencia de inundación. Sin embargo, estadísticas de información desde 1950, indican que 67 poblados de la Región Chorotega han sufrido por lo menos en una ocasión, los efectos de inundaciones a causa del desbordamiento de ríos cercanos (Retana & Solano, 2005).

El huracán Michelle en su paso por Centroamérica en el año 2001 cuando aún era tormenta tropical dejó un total de 10 muertos; en Costa Rica se registraron inundaciones en los cantones de Liberia, Nicoya, Santa Cruz, Carrillo, Nandayure, La Cruz, entre otros. Este fenómeno generó daños en la infraestructura vial, agricultura, acueducto y alrededor de 2000 viviendas afectadas (Vallejos, Esquivel, & Hidalgo, 2017).

Para el 4 de septiembre del año 2008 se vuelven a generar crecidas en algunos ríos de Guanacaste, según Arguedas (2008) las inundaciones fueron generadas por la influencia de la tormenta tropical Hanna, que se desplazaba al sur de las Bahamas en el mar Caribe.

En el año 2007 se reportaron 300 familias afectadas en los barrios Bambú 1 y 2, debido a la crecida del río Las Palmas, es por este motivo que en el año 2008 la Comisión Nacional

de Emergencias decide ampliar el área hidráulica a 10 metros a cada lado del cauce. (López, 2008).

En el año 2017 se vuelve a desbordar nuevamente el río Las Palmas afectando a las comunidades de Paso Tempisque y Palmira, en este evento se reportaron un total de 60 personas afectadas, que fueron instaladas en el salón comunal de Filadelfia (Villalobos, 2017).

En octubre del 2017 las fuertes lluvias que afectaron la zona de Guanacaste generaron importantes pérdidas materiales, inundaciones de hogares, así como la muerte de animales, tanto ganado como aves y cerdos, lo que generó un importante impacto sobre la economía de la población de la pampa (Chinchilla, 2017).

Las crecidas de los ríos La Palmas y Tempisque, son muy comunes para las épocas lluviosas, ejemplo de esto son las crecidas registradas en los años 2007 y 2017, esta última generada por la tormenta Nate que azotó al país en el mes de octubre del 2017. Las principales consecuencias del desbordamiento de los ríos fueron el anegamiento de algunas comunidades y pérdidas económicas por la afectación de los cultivos que son sembrados en sus márgenes.

La especialización de software para el análisis hidráulico de los ríos ha tenido un notable crecimiento en los últimos años, esto ha permitido que algunas instituciones empiecen a tomar decisiones a partir de un análisis hidráulico unidimensional o bidimensional, ya que la información obtenida a partir de estos programas permite identificar zonas de riesgo de inundación, ejemplo de esto es el proyecto desarrollado por la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico para la cuenca del río La Estrella en Limón. En dicho proyecto se generaron manchas de inundación para diferentes periodos de retorno y se espera que la Comisión Nacional de Emergencias tome medidas de protección en las zonas donde el río se pueda llegar a desbordar (Guzmán, Watson , Villagra , & Casasol, 2017).

5.3 Uso de suelos e hidrología

A partir de las inundaciones documentadas en los últimos 20 años, se seleccionó la tormenta Nate por su impacto en la cuenca media del Tempisque y con los datos de precipitación proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), se generaron los hidrogramas de crecidas de las microcuencas que conforman el río Las Palmas, en el caso

del Tempisque se usaron los datos de la estación de niveles localizada en la comunidad de Guardia.

Para determinar el periodo de retorno de la tormenta Nate, se usaron las ecuaciones de las curvas de Intensidad Duración y Frecuencia de las estaciones localizadas en el aeropuerto de Liberia y La Guinea.

Las curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) se construyen por medio de puntos representativos de la intensidad media de precipitación para diferentes duraciones, correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno. Mediante las curvas IDF es posible estimar la intensidad de tormentas intensas de distintas duraciones y para diferentes períodos de retorno (Hinojosa, 1987).

Como método de transformación se usó el método de Número de Curva (CN), desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) actualmente Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS) de los EEUU.

El nombre del método se deriva de una serie de curvas, cada una de las cuales lleva el número N, que varía de 1 a 100. Un número de curva $N = 100$, indica que toda la lluvia escurre, y un número $N = 1$, indica que toda la lluvia se infiltra; por tal razón los números de curvas representan coeficiente de escorrentía (Villón, 2015).

Este método considera los siguientes factores: Cobertura, pendiente, tipo de suelos y humedad antecedente.

La condición humedad antecedente (CHA), se refiere al estado de humedad en el cual se encuentra el suelo y se clasifica de uno (CHA I) a tres (CHA III). Siendo la condición tres, en la que el suelo se encuentra completamente saturado, por lo que su capacidad de absorción es limitada generando mayor escorrentía (Villón, 2006).

Para determinar el uso de suelos de las cuencas se usaron imágenes satelitales Sentinel 2A, estas imágenes forman parte de una familia de satélites de observación de la tierra denominado Copernicus, iniciativa de la Agencia Espacial Europea (ESA). En particular, el Sentinel 2A fue puesto en órbita en junio de 2015 y ofrece imágenes cada 10 días con interesante resolución espacial y espectral. Sus características lo hacen apto tanto para estudios zonales o regionales como para escala a nivel de predio. Genera información en bandas del visible, infrarrojo cercano, medio y térmico, con resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 m según las bandas. Espectralmente ofrece especial detalle en la región del infrarrojo

cercano, característica que permite el cálculo de índices de vegetación para determinar contenido de clorofila e índice de área foliar, entre otros. Al igual que el anterior, la calidad de la imagen es susceptible a presencia de nubes (Ferreya, 2016).

5.4 Caracterización de las cuencas

Existen diferentes parámetros para caracterizar las cuencas según: su forma, topografía, red de drenaje, entre otros. Para efectos de este proyecto solo se obtendrán los resultados de: curvas hipsométricas, pendientes medias de los cauces principales, pendientes medias de las cuencas e índice de compacidad.

La curva hipsométrica Strahler (2011) permite conocer la distribución de masa en la cuenca desde arriba hacia abajo. La curva de frecuencia de altitudes es un complemento que permite determinar en forma gráfica las superficies ocupadas por diferentes altitudes.

Por medio de la curva hipsométrica es posible determinar la etapa geológica, así como también el ciclo erosivo de la cuenca y del tipo de cuenca, con potencial evolutivo diferente como se muestra en la figura 2.

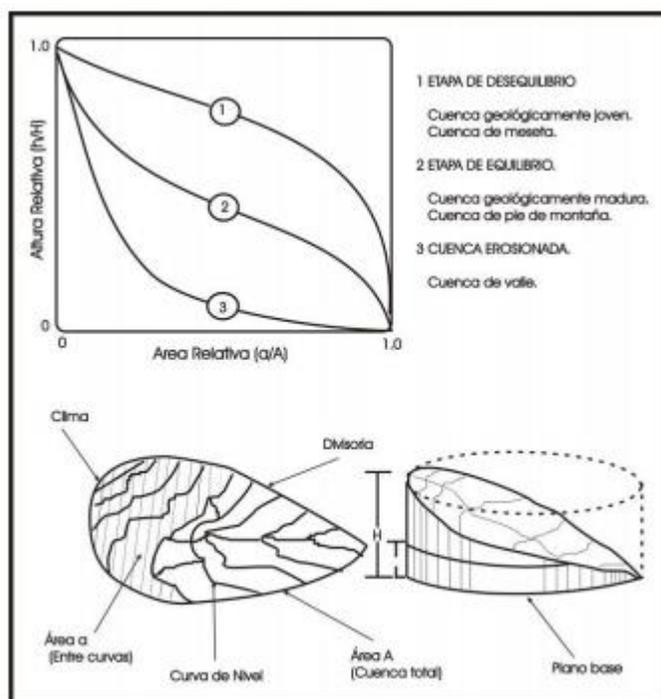


Figura 2. Clasificación de cuencas, según su curva hipsométrica.

Fuente: (Meza, 2010)

El Índice de compacidad o Gravelious (K), relaciona el perímetro de una cuenca con el perímetro de una circunferencia de igual área, por medio de este índice se trata de relacionar la influencia del perímetro y área de una cuenca sobre la escorrentía. Si $K = 1$, la cuenca tiene forma circular, pero $K > 1$, la forma es alargada. La importancia que tiene este índice es que permite estimar de forma muy general la probabilidad de que una cuenca sea cubierta por una tormenta en forma simultánea (Barrera, 2006).

Uno de los parámetros más importantes de una cuenca es su tiempo de concentración, que se define como “el tiempo en el cual la escorrentía superficial del punto más alejado de la cuenca alcanza el punto de desagüe o salida, es decir el tiempo en el cual toda la cuenca contribuye al flujo” (Vélez & Botero , 2010).

La pendiente media de la cuenca es un parámetro de muy importante en el estudio de cuencas, pues da un índice de la velocidad media de la escorrentía y su poder de arrastre y de la erosión sobre la cuenca, además es uno de los factores que controla el escurrimiento y tiempos de concentración de la red de drenaje. (Villón, 2015)

5.5 Modelos hidráulicos

Los estudios en modelos de ríos son usados para resolver problemas de regulación de ríos o desarrollos hidro energéticos, determinar el tiempo de desplazamiento de ondas de inundación por los cauces de los ríos, métodos para el mejoramiento de canales para la transmisión de inundaciones con menos riesgo de desbordamiento sobre las orillas, los efectos de los acortamientos de los ríos, efecto de diques, paredes de contención sobre la erosión de los lechos, altura de los remansos provocados por estructuras permanentes o temporales construidas en medio de un cauce; dirección y fuerzas de corriente en ríos y puertos y sus efectos sobre la navegación entre otros (Pérez, 2018).

Existen diferentes programas computacionales para realizar modelos hidráulicos, el nivel de precisión de los resultados está ligado con la calidad de los datos con que se esté operando, esto quiere decir que un programa que realice modelos unidimensionales puede generar mejores resultados que programas que realicen modelos bidimensionales o tridimensionales.

En este proyecto se usó el programa IBER, el cual resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations

(2D-SWE) o ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Estas ecuaciones asumen que la distribución de presión y velocidad en la profundidad, son relativamente uniformes. (Ruíz, 2017)

El Número de Froude permite clasificar el tipo de flujo presente en una corriente de agua y lo divide en tres tipos que son:

$Fr > 1$ Flujo subcrítico o tranquilo

$Fr < 1$ Flujo crítico

$Fr = 1$ Flujo supercrítico o rápido

Por medio de la clasificación del tipo de flujo, se puede determinar cuáles pueden ser los efectos de cualquier particularidad presente en el río sobre su cauce. Los flujos supercríticos generan efectos aguas hacia abajo y los subcríticos hacia arriba de la localización de cualquier particularidad. (Cengrl & Cimbala , 2006)

Los modelos de elevación digital (MED), son un elemento importante para realizar modelos hidrodinámicos, ya en ellos se contiene la forma del relieve. Según Felicísimo (2015) un MED, es una representación estadística de la superficie continua del terreno, mediante un número elevado de puntos selectos con coordenadas (x,y,z) conocidas, en un sistema de coordenadas arbitrario.

5.6 Validación de resultados

La validación del modelo desarrollado en este proyecto permitirá darle credibilidad a los datos que se generen, ya que será posible comparar la información registrada durante la tormenta Nate versus los resultados obtenidos con el modelo hidrodinámico.

Para calibrar el modelo hidráulico se realizará un procedimiento similar al que se usa para el cálculo de caudales por el método de Huellas Máximas.

El método de Huellas Máximas consiste en estimar el gasto máximo que se presentó durante una avenida reciente, en un río donde no se cuenta con ningún otro tipo de aforo. Para su aplicación se requiere solamente contar con topografía de un tramo del cauce y las marcas del nivel máximo del agua durante el paso de la avenida (Martínez & Fernández, 2015).

Como elemento de comparación se usarán las marcas de inundación y niveles máximos que se registraron durante la tormenta Nate, a este tipo de información se le conoce como Indicadores Geomorfológicos Fluviales.

Los indicadores son elementos de referencia que aportan información cuantitativa o cualitativa (datos, percepciones, hechos o medidas) para el seguimiento y evaluación de un proceso. Pueden considerarse herramientas que proporcionan información sintética sobre una realidad compleja, lo cual es imprescindible para la gestión medioambiental (Ollero, 2011).

6 Metodología

La metodología empleada para el desarrollo del proyecto se detalla a continuación:

6.1 Recursos usados

Software especializado para análisis de agrimensura y obras civiles (SEAOC): AutoCAD 2017 y Autocad Civil 3d 2017

Software especializado para integración de Sistemas de Información Geográfica (GIS): QGIS

Software especializado para el análisis de datos topográficos: Surfer 2013

Software especializado en la modelación numérica en 2D Iber 2.3.2

Software especializado en la descarga de imágenes satelitales SASPlanet.

Software especializado en modelos hidrológicos HEC-HMS 4.2

Base de datos de las estaciones meteorológicas del aeropuerto Liberia y La Guinea.

Paquete de Microsoft Office

Imágenes satelitales Sentinel 2A

Base de Datos Atlas Digital 2014

6.2 Topografía

Los datos topográficos que se usaron para generar los modelos de elevación y delimitación de áreas de influencia corresponden a la combinación de una nube de puntos proporcionada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) e información recolectada de secciones transversales de los ríos Las Palmas y Tempisque obtenida de la base de datos de Senara.

6.3 Delimitación de la cuenca del río Las Palmas y su cobertura.

El modelo de elevación que se generó sirvió como base para realizar: la delimitación de la cuenca de Las Palmas, red de drenaje, longitud del cauce principal y las microcuencas que forman el río Las Palmas.

Se descargaron imágenes satelitales Sentinel 2A, para determinar el uso de suelos actual de las sub-cuencas, para este proceso se realizó una clasificación semi-supervisada en el programa QGis.

Con las sub-cuencas delimitadas se realizó un recorte al Mapa de Suelos de Costa Rica disponible en la página de la FAO.

. La información que se generó en esta sección se usó para realizar operaciones raster en el programa QGis y así determinar los números de curva correspondientes a las sub-cuencas.

6.4 Las precipitaciones generadas por la tormenta Nate comparada con otros eventos de magnitud similar.

Para determinar los eventos de mayor magnitud se utilizaron los datos de precipitación de estaciones meteorológicas, información sobre fechas de inundaciones en la zona registradas en los medios de comunicación, informes de la Comisión Nacional de Emergencia y entrevistas a las personas que viven en las orillas de los ríos.

Con las fechas de los eventos extraordinarios definidos, se elaboraron los hietogramas con los datos meteorológicos de las estaciones localizadas en: Aeropuerto Liberia y La Guinea. En la figura 3 se muestra la ubicación geográfica de las estaciones proporcionadas por el IMN y además se muestra la estación de niveles con la que se va a realizar el hidrograma de la tormenta Nate en el río Tempisque.

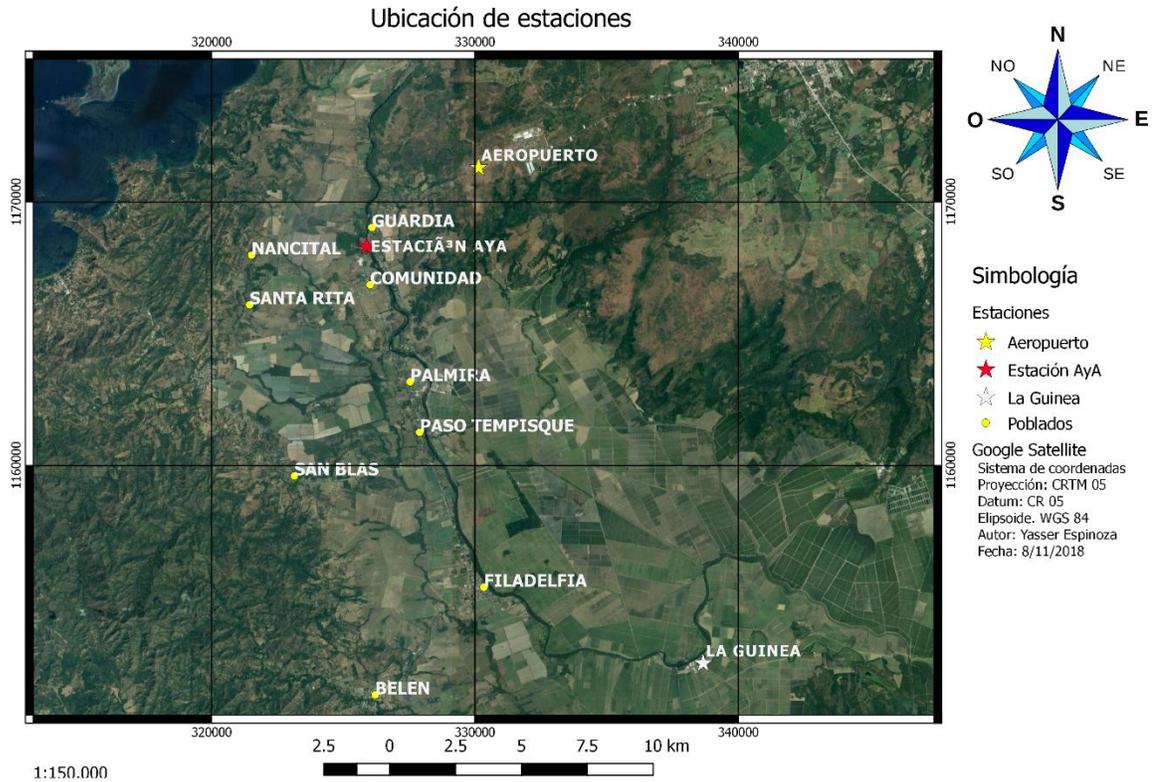


Figura 3. Ubicación de estaciones.

6.5 Determinación de hidrogramas del río Tempisque y las microcuencas del río Las Palmas.

Para determinar los hidrogramas de crecida del río Las Palmas se usó el programa HEC-HMS 4.2, los métodos hidrológicos y de pérdidas usados para la transformación de precipitación a caudales fueron desarrollados por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS).

Para determinar el número de curva de las sub-cuencas se realizaron operaciones raster de manera que se relacionaron los datos de cobertura, pendiente y ordenes de suelos. Los números de curva obtenidos con estas operaciones corresponden a una condición de humedad antecedente 2 (CHA II),

Se elaboraron los hidrogramas para las condiciones de humedad antecedente 2 y 3, para evaluar cuál de las dos condiciones se asemeja más a lo ocurrido por las inundaciones que generó la tormenta Nate.

El cálculo del número de curva para una condición de humedad antecedente 3, se realizó con la siguiente ecuación:

$$N_{III} = \frac{23 * N_{II}}{10 + 0,13 * N_{III}} \dots Ecuación 1$$

Donde:

N_{II} = Número de curva para una condición hidrológica 2 (CHA II).

N_{III} = Número de curva para condición hidrológica 3 (CHA III)

El tiempo de concentración se calculó con la ecuación de Kipich, la cual considera las siguientes variables:

$$t_c = 0,0195 * \left(\frac{L^2}{H}\right)^{0,385} \dots Ecuación 2$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración (min)

L = Longitud del cuace principal (m)

H = Diferencia de cotas entre los extremos del cuace principal (m)

El tiempo de retardo se calculó con la siguiente ecuación:

$$tr = 0,6 * tc \dots Ecuación 3$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración (min)

tr = Tiempo de retardo (min)

Para elaborar el hidrograma que generó la Tormenta Nate en el río Tempisque, se solicitaron datos al Instituto de Acueducto y Alcantarillados (AyA) de la estación de niveles localizada en la comunidad de Guardia.

Los datos proporcionados por el AyA correspondían a los niveles que alcanzó el río en la tormenta Nate, por lo que se usó el programa Iber para realizar un modelo matemático que permita evaluar los niveles proporcionados por el AyA y obtener el hidrograma de la tormenta, cabe destacar que con Iber es posible relacionar el caudal con la rugosidad y pendiente del cauce, ya que permite cargar modelos de elevación.

El procedimiento para elaborar el modelo matemático es el siguiente:

1. Se seleccionó una sección del cauce que va de la ubicación de la estación hidrométrica en el puente sobre el río Tempisque hasta un kilómetro aguas abajo.

- Una vez definida la sección se ingresaron los datos del hidrograma que se muestra en la figura 4 y se puso a calcular el programa Iber.

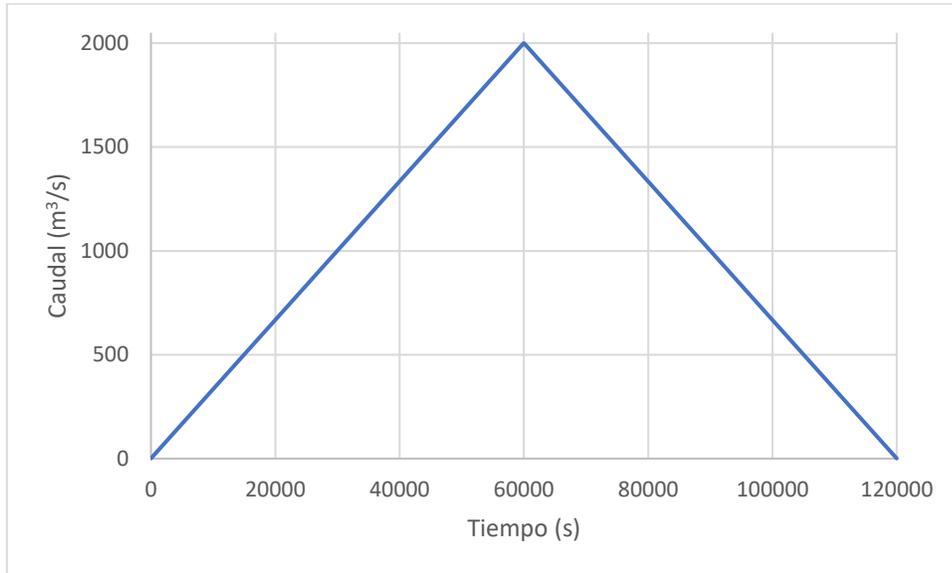


Figura 4. Hidrograma para evaluar un tramo de un kilómetro del río Tempisque.

- A partir de los resultados obtenidos al evaluar la sección del Tempisque, se seleccionó la ubicación de la estación y se extrajeron los datos de como evolucionaron los tirantes y caudales durante la modelación hidrodinámica.
- Con los datos extraídos se realizó una correlación por medio del método de mínimos cuadrados que se muestra a continuación:

Forma de la ecuación:

$$a_2 * X^2 + a_1 * X + a_0 \dots Ecuación 4$$

- Para encontrar los valores de a_0 , a_1 , a_2 , se debe de resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\sum Y = a_0 + a_1 * \sum X + a_2 * \sum X^2 \dots Ecuación 5$$

$$\sum (X * Y) = a_0 * \sum X + a_1 * \sum X^2 + a_2 * \sum X^3 \dots Ecuación 6$$

$$\sum (X^2 * Y) = a_0 * \sum X^2 + a_1 * \sum X^3 + a_2 * \sum X^4 \dots Ecuación 7$$

Donde:

$$Y = \text{Caudal} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$X = \text{Tirante} (m)$$

$a_0, a_1, a_2 =$ Parámetros de la ecuación

Coefficiente de correlación:

$$r = \frac{n * \sum(x * y) - \sum x * \sum y}{\sqrt{(n * \sum x^2 - (\sum x)^2) * (n * \sum y^2 - (\sum y)^2)}} \dots Ecuación 8$$

Donde:

$$y = \text{Caudal } \left(\frac{m^3}{s}\right)$$

$$x = \text{Tirante } (m)$$

$$r = \text{Coeficiente de correlación}$$

6.6 Cálculo de precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno

Para determinar el periodo de retorno de las precipitaciones que generó la tormenta Nate, se evaluaron las ecuaciones correspondientes a las curvas IDF de las estaciones ubicadas en el Aeropuerto de Liberia y La Guinea. Las ecuaciones usadas se muestran a continuación:

$$I_{La\ Guinea} = 717,79 * \frac{T^{0,126}}{D^{0,671}} \dots Ecuación 10$$

$$I_{Aeropuerto\ Liberia} = 548,00 * \frac{T^{0,153}}{D^{0,6}} \dots Ecuación 11$$

Donde:

$$I = \text{Intensidad } \left(\frac{mm}{h}\right)$$

$$T = \text{Periodo de retorno en años}$$

$$D = \text{Duración } (min)$$

Para calcular las precipitaciones, se multiplicaron los resultados obtenidos con las ecuaciones 10 y 11, por el número de horas (48 horas) que afectó Nate la provincia de Guanacaste.

Cabe destacar que al evaluar estas ecuaciones se puede presentar el caso que alguna genere valores irracionales, por lo que se deberá considerar si se descarta algún valor de los que se van a generar.

6.7 Modelación hidráulica

El modelo hidráulico se realizó en el programa IBER 2.3.2, para determinar el comportamiento de los caudales y generar las manchas de inundación.

Cabe destacar que la información obtenida de los modelos servirá como base para el diseño de obras de protección de la red de canales del proyecto Paacume, por este motivo es importante identificar las zonas más críticas y determinar lo tirantes máximos que se podrían presentar.

6.8 Validación de resultados

La verificación del modelo se realizó comparando los resultados obtenidos contra los videos registrados por los medios de comunicación nacional, un video realizado con un Drone por Saul Cárdenas el día 5 de octubre en horas de la tarde y fotografías tomadas por Pedro Camacho y Domitila Rodríguez ambos vecinos del barrio Bambú. Datos que se muestran ampliamente en el apartado de resultados.

7 Resultados y análisis de resultados

Las cuencas de los ríos Las Palmas y Tempisque tienen la particularidad de presentar una topografía relativamente plana a excepción de la cuenca alta del río Tempisque, que tiene como punto más alto el volcán Rincón de la Vieja, a unos 1900 metros sobre el nivel del mar (msnm). En el caso del río Las Palmas su punto más alto se ubica a 550 (msnm)

En las figuras 5 y 10, se muestran los mapas de altitudes de las cuencas de los ríos Las Palmas y Tempisque respectivamente.

7.1 Delimitación de las cuencas y caracterización de las cuencas

La cuenca del río Las Palmas es una subcuenca del río Tempisque, entre ambas cubren gran parte de la zona productiva de la provincia de Guanacaste y además representan el 21% del área total de la provincia.

El río las Palmas y sus afluentes, recolectan la mayor parte de las aguas provenientes de precipitaciones del cantón de Carrillo, en el caso del Tempisque recoge casi que todas las aguas del cantón de Liberia y además algunos de sus afluentes provienen de los cantones de La Cruz y Bagaces.

Por la ubicación geográfica de las cuencas están propensas a tener importantes variaciones en la cantidad de precipitación de un año a otro, por lo que se dificulta tener un valor promedio de precipitaciones de la zona. Para el registro de datos otorgados por el IMN de la estación de Liberia, se obtuvo que la precipitación promedio anual entre los años 1999 y 2017 fue de 1562 mm, pero con variaciones importantes en años consecutivos como es el caso de los años 2008 y 2009, donde se registraron 2253,6 y 1001,2 mm respectivamente.

7.1.1 Las Palmas

La cuenca del río Las Palmas posee un área de 400,06 km², su punto más alto corresponde al Cerro Guachipelín con una altura aproximada de 550 metros sobre el nivel del mar (msnm), su punto más bajo a 5 msnm y se ubica cerca de la comunidad de Ortega. Este río nace cerca del poblado de Nancital, del distrito de Sardinal del cantón de Carrillo a una altura aproximada de 28 msnm, dentro de sus principales afluentes se encuentran los ríos Belén, San Blas y Sardinal, siendo este último el encargado de evacuar el mayor porcentaje de las aguas de las partes altas de la cuenca. En la figura 5 se muestra el mapa de la cuenca con sus respectivas altitudes.

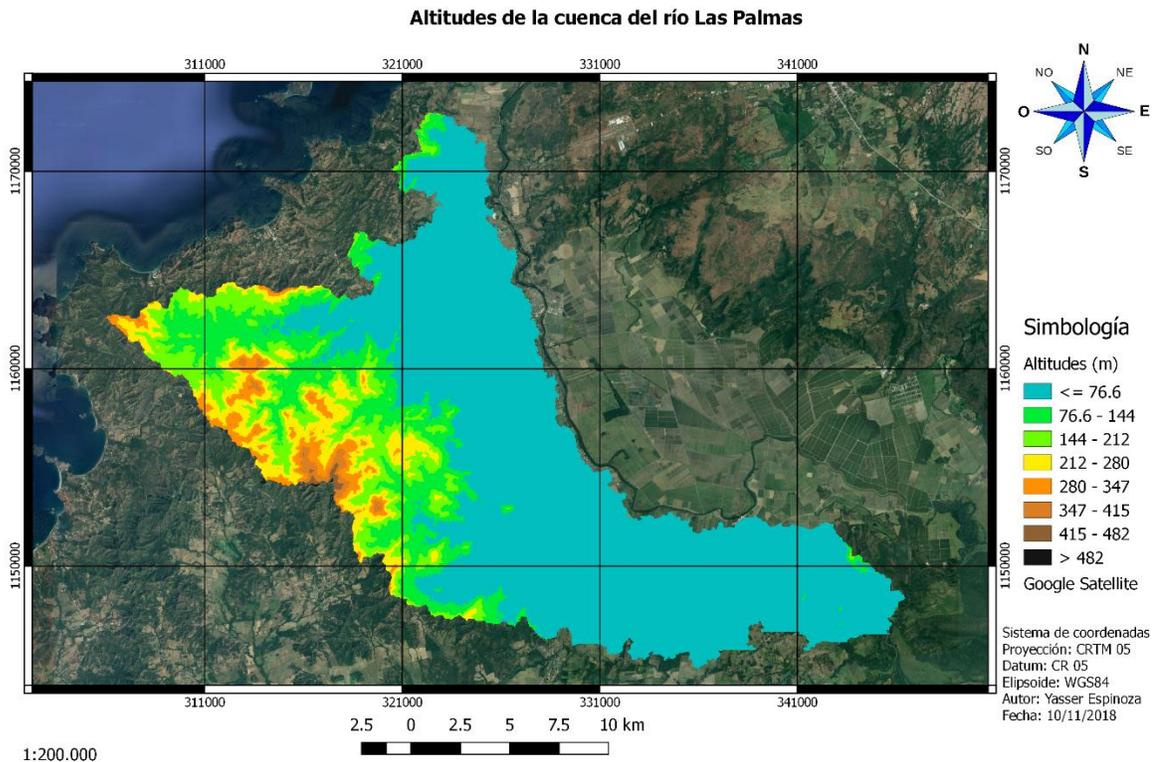


Figura 5. Cuenca del río Las Palmas y sus altitudes.

Las zonas bajas de la cuenca son usadas para la siembra de caña de azúcar, melón y pastoreo, estas actividades junto al turismo corresponden a las principales fuentes de empleo de la zona.

En la figura 5 se observa que más de la mitad del área de la cuenca, corresponde a altitudes inferiores a los 100 msnm. Estas son áreas de muy baja pendiente, lo que genera una lenta respuesta del cauce para evacuar las aguas, esta condición ocasiona que algunas comunidades de Filadelfia se vean afectados con inundaciones cuando se presentan precipitaciones con intensidades altas por un tiempo prolongado.

Las microcuencas de los ríos Belén, San Blas y Sardinal, son las que se encargan de evacuar las aguas de las zonas altas de la cuenca del río Las Palmas y en ellas se encuentran las mayores pendientes. Es posible que estas microcuencas al evacuar las aguas mucho más rápido que las partes bajas de la cuenca del río Las Palmas, generen una concentración de flujo y como consecuencia el cauce principal no de abasto y se desborde; ocasionando situaciones que generan pérdidas de cultivos, infraestructura, y afectación al turismo por ende

provocando un impacto directo a nivel socioeconómico de la población. En la figura 6 se observa el mapa de pendientes de la cuenca del río Las Palmas y la ubicación de las microcuencas de los ríos Belén, San Blas y Sardinal.

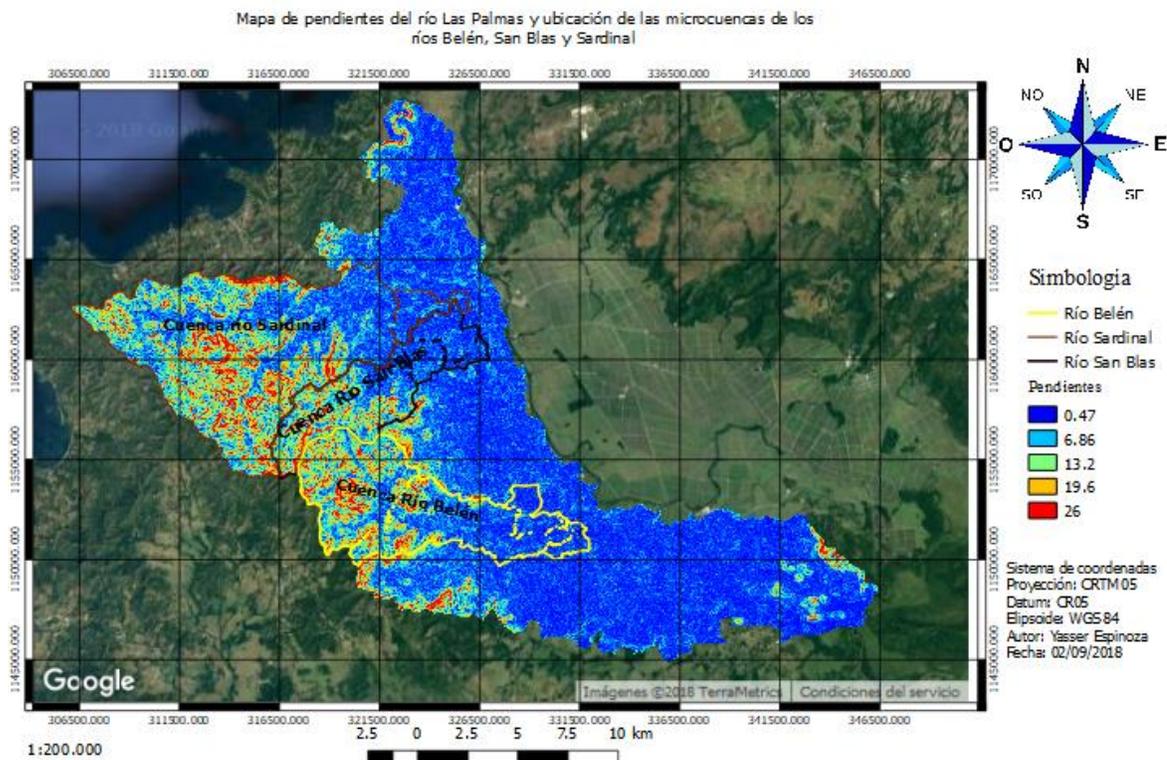


Figura 6. Pendientes de la cuenca del río Las Palmas y ubicación de las microcuencas de los ríos Belén, San Blas y Sardinal.

La cuenca del río Las Palmas se clasifica como una cuenca sedimentaria o vieja, debido a la forma de su curva hipsométrica (figura 7), este tipo de cuenca tiene la característica de presentar acumulaciones de sedimentos.

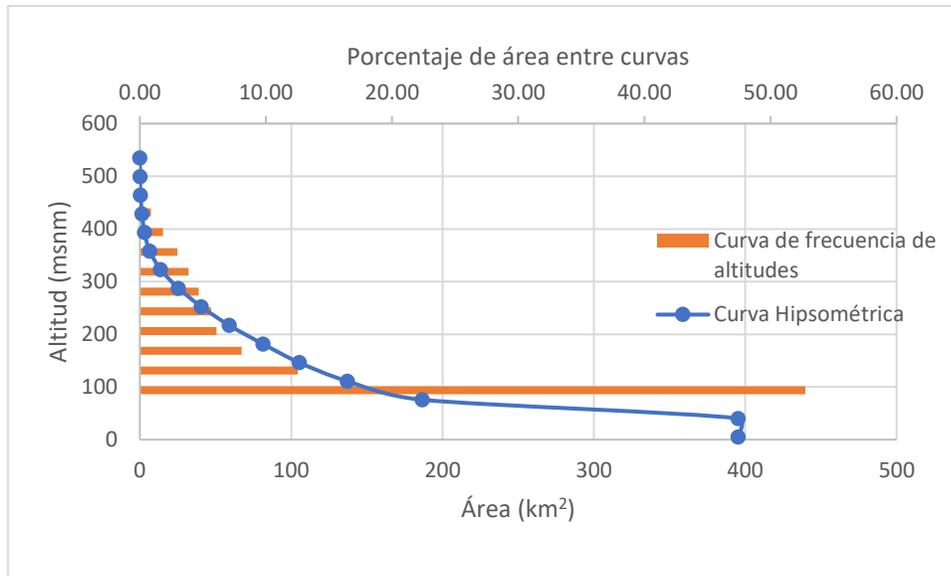


Figura 7. Curva hipsométrica y curva de frecuencia de altitudes.

Por la forma de la curva hipsométrica y lo observado en campo, se puede confirmar que la cuenca del río Las Palmas se clasifica como una cuenca tipo sedimentaria, ya que presenta topografía plana y con importantes acumulaciones de sedimentos en su cauce principal.

Parte de la evidencia que se recolectó durante el recorrido por el cauce del río Las Palmas, se muestra en la figura 8, donde un machete alcanzó una profundidad aproximada de 0,40 m al ser dejado caer sobre un banco de sedimentos desde un metro de altura. La acumulación y transporte de sedimentos representan un serio problema, ya que reducen la capacidad hidráulica del cauce y es probable que este sea uno de los factores que influyen en el desbordamiento del río Las Palmas.



Figura 8. Acumulación de sedimentos en el cauce del río Las Palmas.

Durante el recorrido por el cauce del río Las Palmas, se logró identificar algunas zonas con importante acumulación de material vegetal, esto se puede observar en la figura 9. En los sectores donde se localizaban los troncos el nivel del agua era de casi medio metro, mientras que en las zonas sin ningún tipo de obstáculo el tirante era menor a los 0,20 m.



Figura 9. Acumulación de basura en el cauce del río Las Palmas.

7.1.2 Río Tempisque

La margen izquierda de la cuenca del río Tempisque tiene un área de 1763, 94 km² y su cauce principal nace en las faldas del volcán Orosí, dentro de sus principales afluentes se encuentran los ríos Colorado, Las Palmas y Liberia.

Esta cuenca tiene una zona con altitudes que logran alcanzar los 1900 msnm y otra muy plana, que es aprovechada para la siembra de caña de azúcar, arroz, melón, entre otros. En la figura 10 se muestra el mapa de altitudes.

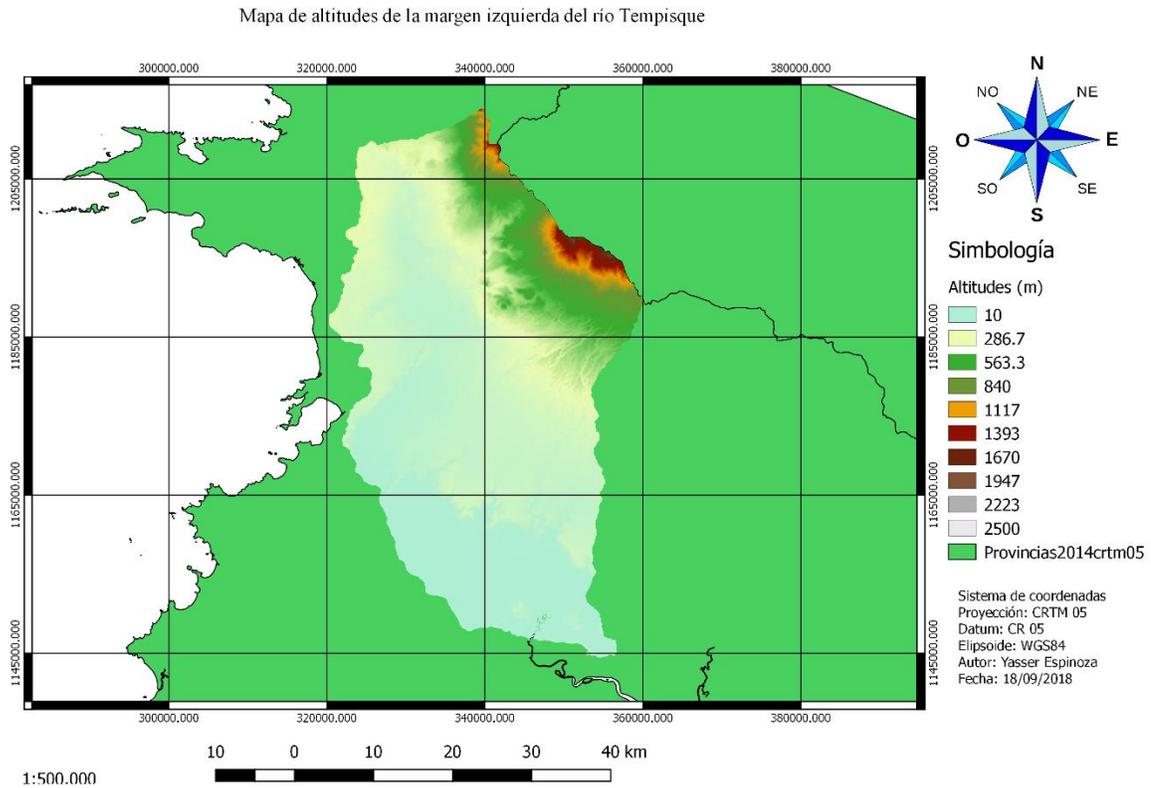


Figura 10. Mapa de altitudes de la margen izquierda del río Tempisque.

Las partes bajas de la cuenca son propensas a inundaciones, ya que se caracterizan por ser muy planas. Eventos como el huracán Mitch en el 1998 y la tormenta Nate, lograron inundar grandes extensiones de tierra y además afectaron algunas comunidades como por ejemplo La Guinea y Corralillo.

Iván Camareno y Julia Martínez habitantes de la comunidad de La Guinea expresaron que cada año al llegar el invierno existe el temor de ser afectados por una crecida del río, ya que sus efectos se mantienen por un período de tiempo e incluso de por vida, como por ejemplo la casa que se muestra en la figura 11.



Figura 11. Vecina de la comunidad de La Guinea limpiando el acceso a su hogar después de la crecida originada por el huracán Mitch.

Fuente: (Martínez, 2018)

En la figura 11 se logra observar que el río arrastra gran cantidad de sedimentos en cada una de sus crecidas, según expresó la persona de la imagen anterior, que al momento de construir su vivienda el nivel del piso era similar al de la calle, pero con las crecidas de los últimos años el piso quedó por debajo del nivel de la calle.

Otros vecinos de la comunidad de La Guinea también expresaron que nunca habían visto una crecida similar a la originada por la tormenta Nate, que las calles se convirtieron en ríos (ver figura 12) y que el 90% de los hogares de la comunidad tuvieron pérdidas de electrodomésticos.



Figura 12. Calle en La Guinea durante la tormenta Nate.

7.2 Áreas de influencias

La falta de datos topográficos de los ríos fue una de las principales limitantes ya que no se disponía de información de la forma de los cauces del río Sardinal y de la cuenca alta del río Las Palmas, por lo que se seleccionó como primera entrada de caudal al modelo, la sección ubicada a 50 metros aguas arriba del puente sobre la Ruta 912 (Calle Chalaco), con un área de influencia de 143,04 km². La segunda entrada de caudal al modelo del río Las Palmas, corresponde al aporte del Río San Blas, que tiene un área de influencia de 31,785 km².

En el caso del Tempisque, solo se disponía de 25 secciones transversales del río, en el trayecto que va del puente sobre la Ruta 21 hasta la comunidad de La Guinea, por lo que fue necesario realizar interpolación de secciones con el programa Hec-Ras. Para realizar el modelo hidrológico de este río no fue necesario determinar áreas de influencia, ya que se utilizaron los datos de niveles de la estación ubicada en el puente sobre el río Tempisque en Guardia. En la figura 16 se observa los puntos de inicio y final de las secciones de los ríos Tempisque y Las Palmas que fueron evaluados.

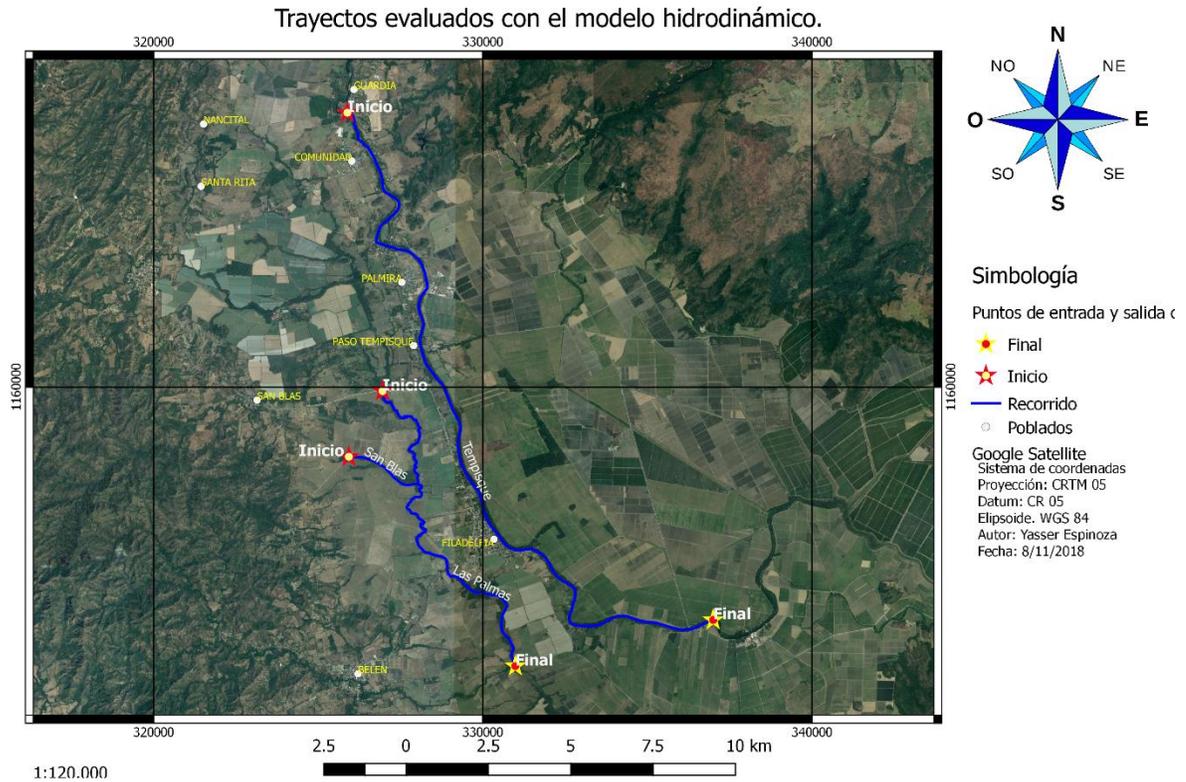


Figura 13. Ruta de modelación del río Las Palmas y Tempisque.

La longitud del modelo del río Tempisque corresponde a 25,54 km, que atraviesa diferentes poblados y una importante área dedicada a la siembra de caña de azúcar.

En el caso del río Las Palmas, se modeló un total de 13,83 km que va desde la Ruta 912 hasta la unión con el río Belén, cabe destacar que también se evaluó una sección de 2,3 km correspondientes al río San Blas.

7.3 Análisis hidrológico

La provincia de Guanacaste se caracteriza por tener 2 estaciones climáticas muy bien definidas, siendo esta una limitante para muchos productores de la margen derecha del río Tempisque, ya que actualmente no se dispone de agua para riego los 12 meses del año, lo que los obliga a sembrar solamente en invierno, con el riesgo de que las lluvias se ausenten y les genere importantes pérdidas.

Con los datos solicitados al IMN de las estaciones meteorológicas ubicadas en el aeropuerto de Liberia (74 051), La Guinea (74 067) y El Corral, Palo Verde (74 061), se logró observar el comportamiento de las precipitaciones por un espacio de 18 años (del año

1999 hasta el 2017), cabe destacar que solamente la estación de Liberia tenía registro de los datos horarios en ese periodo de tiempo; en el caso de las estaciones de El Corral y La Guinea, los registros inician en el año 2012 y 2013 respectivamente.

Según lo observado del registro de datos, las precipitaciones anuales de los últimos 18 años, para la provincia de Guanacaste, en la mayoría de los años fue inferior a 2000 mm anuales, también se presentaron años en que las precipitaciones no llegaron ni a los 1500 mm anuales, esto se puede observar en la figura 14.

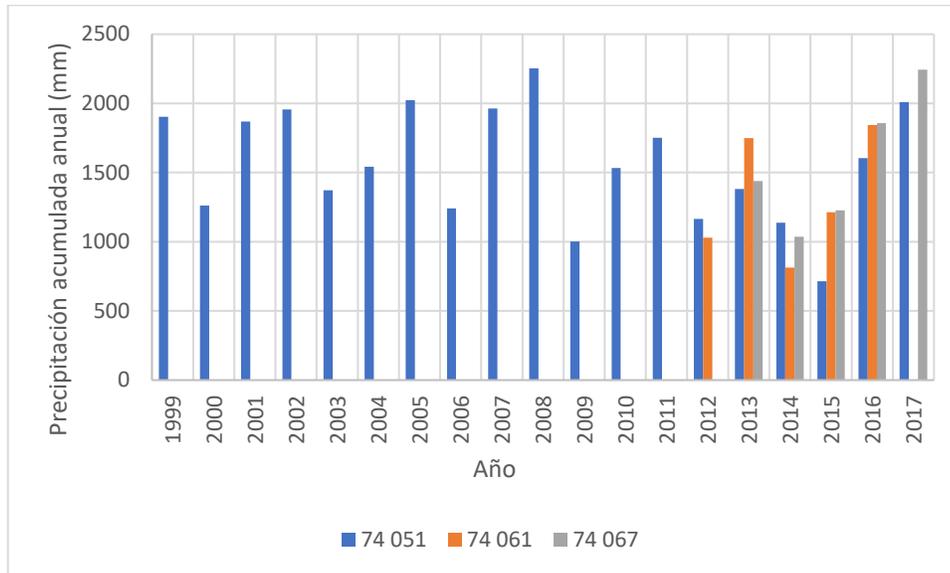


Figura 14. Precipitaciones anuales.

En la figura 14 se observa que, en los años 2009, 2012, 2014 y 2015, las precipitaciones fueron las menores de los últimos 18 años, siendo los años 2014 y 2015 en forma consecutiva.

Una de las principales causas que ocasionan las inundaciones en la zona de estudio, es que se presentan altas precipitaciones en periodos de tiempos muy cortos, lo que genera escorrentía, ya que el suelo solo tiene la capacidad de infiltrar una pequeña parte de la precipitación. En la figura 15 se muestran las precipitaciones máximas diarias de los últimos 18 años.

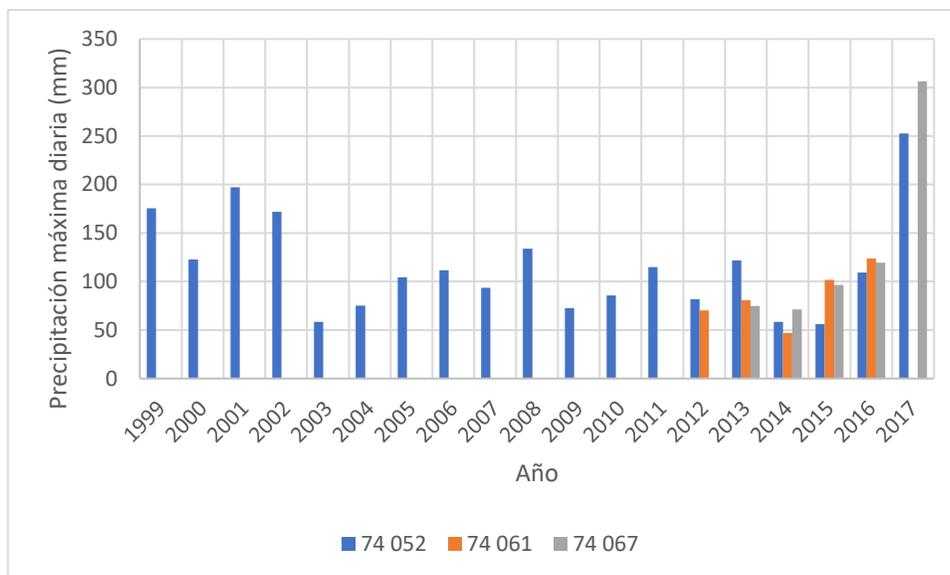


Figura 15. Precipitaciones máximas diarias de los últimos 19 años.

De la figura 15, se puede observar que la precipitación máxima diaria de los últimos 19 años ocurrió en el 2017, donde las estaciones de La Guinea y la del aeropuerto de Liberia registraron un total de 306,4 y 252,6 mm por día.

Cabe destacar que las precipitaciones máximas diarias que se registraron corresponden a la influencia que tuvo la tormenta Nate sobre el país, principalmente en Guanacaste, generando importantes inundaciones. Para darnos una idea de la magnitud del evento Nate, en el cuadro 3 se muestran las precipitaciones acumuladas para diferentes días consecutivos de eventos ocurridos en diferentes años.

Cuadro 3. Altura de precipitación acumulada para diferentes días consecutivos.

Año	Estación	Días de Lluvia	Precipitación (mm)
2001	Aeropuerto Liberia	3	503,4
2007	Aeropuerto Liberia	4	247,1
2008	Aeropuerto Liberia	3	296,7
2017	Aeropuerto Liberia	2	401,2
2017	La Guinea	2	428,0

En el cuadro 3 se observa que, para dos días consecutivos de lluvias, los registros de la tormenta Nate superan al resto de eventos que se registraron, ya que en las estaciones de La

Guinea y la del aeropuerto de Liberia se registraron un total de 428 y 401,2 mm, estos valores nos indican que cayeron de 0,428 a 0,4012 metros cúbicos de agua por metro cuadrado de terreno en dos días de precipitación.

Para determinar el periodo de retorno de las precipitaciones generadas por la tormenta Nate, se evaluaron las ecuaciones 10 y 11. Los resultados que se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4. Precipitación para diferentes periodos de retorno, con una duración de 2 días.

Periodo de retorno (años)	Estación	
	Aeropuerto Liberia	La Guinea
	Precipitación (mm)	Precipitación (mm)
1	221,00	164,43
5	282,70	201,40
10	314,33	219,78
20	349,50	239,84
25	361,64	246,68
50	402,10	269,19
75	427,83	283,30
100	447,08	293,76
150	475,69	309,15
200	497,10	320,56
300	528,91	337,37
500	571,91	359,80
1000	635,90	392,63
1500	676,59	413,21

Los resultados obtenidos al evaluar la ecuación correspondiente a la estación de Liberia indican que la precipitación generada por Nate corresponde a un periodo de retorno de 50 años. En el caso de evaluar la ecuación de la estación de La Guinea indicó que el evento de Nate corresponde a un período de retorno superior a los 1500 años, este resultado para efectos de este análisis se descarta.

La tormenta Nate afectó a la provincia de Guanacaste los días 4 y 5 de octubre del 2017, este evento originó que los ríos Tempisque y Las Palmas se desbordaran en diferentes secciones de su recorrido afectando áreas de siembra y algunas comunidades. El hietograma de la tormenta quedo registrado las estaciones del Aeropuerto y La Guinea, su comportamiento se muestra en la figura 19.

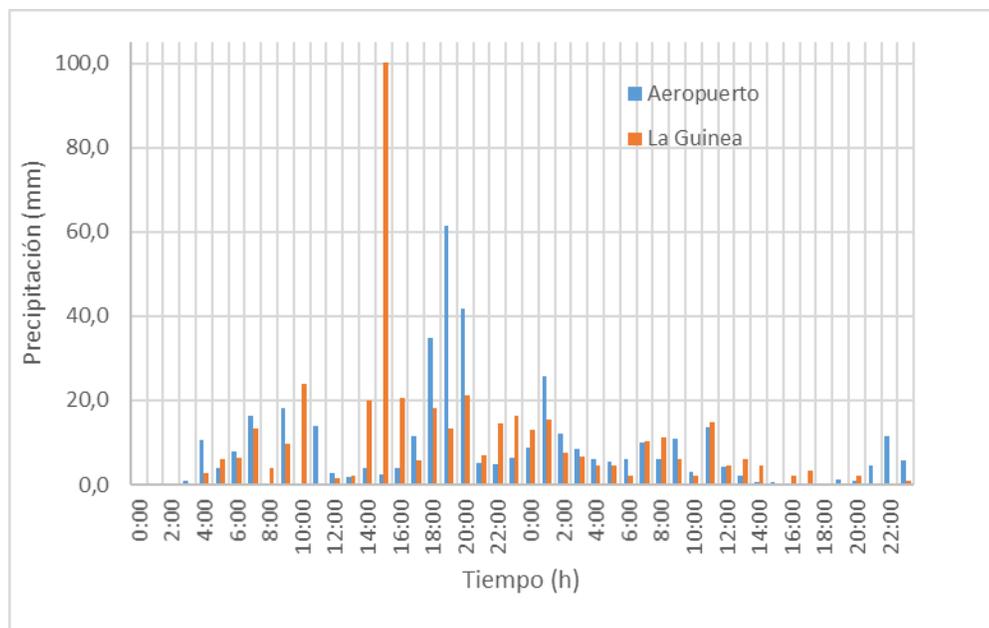


Figura 16. Hietogramas registrados en las estaciones de La Guinea y Aeropuerto Liberia durante la Tormenta Nate.

7.3.1 Modelo hidrológico de la cuenca del río Las Palmas

Las precipitaciones máximas por hora se presentaron el día 4 de octubre en horas de la tarde y noche, pero las inundaciones empezaron la madrugada del 5, afectando principalmente cultivos de caña de azúcar, algunos tramos de la Ruta 21 y el barrio Bambú en Filadelfia.

Cabe destacar que al momento en que se registraron las precipitaciones máximas no hubo reportes de inundaciones, sino hasta 5 horas después, esto se debe a los tiempos que necesitaron la Cuenca Alta del río Las Palmas y río Sardinal para evacuar las aguas. Este lapso de tiempo transcurrido entre el momento en que ocurrieron las precipitaciones máximas y las inundaciones corresponden a los tiempos de concentración de las cuencas y estos se muestran en el cuadro 5.

Cuadro 5. Tiempos de concentración

Cuenca	tiempo de concentración (h)
Río Sardinal	4:50
Cuenca Alta	6:22

Del cuadro 5 se observa que los tiempos de concentración de la Cuenca Alta del río Las Palmas y del río Sardinal son elevados, esto se debe a la topografía de las cuencas, principalmente la de la cuenca Alta, ya que su relieve es muy plano, lo que genera que una

gota que cae en la parte más alejada de la cuenca demore más tiempo en llegar al punto de donde se va a realizar el modelo hidrodinámico.

Para determinar el área de influencia correspondiente a las estaciones meteorológicas se realizó el polígono de Thiessen, el cual se muestra en la figura 20.

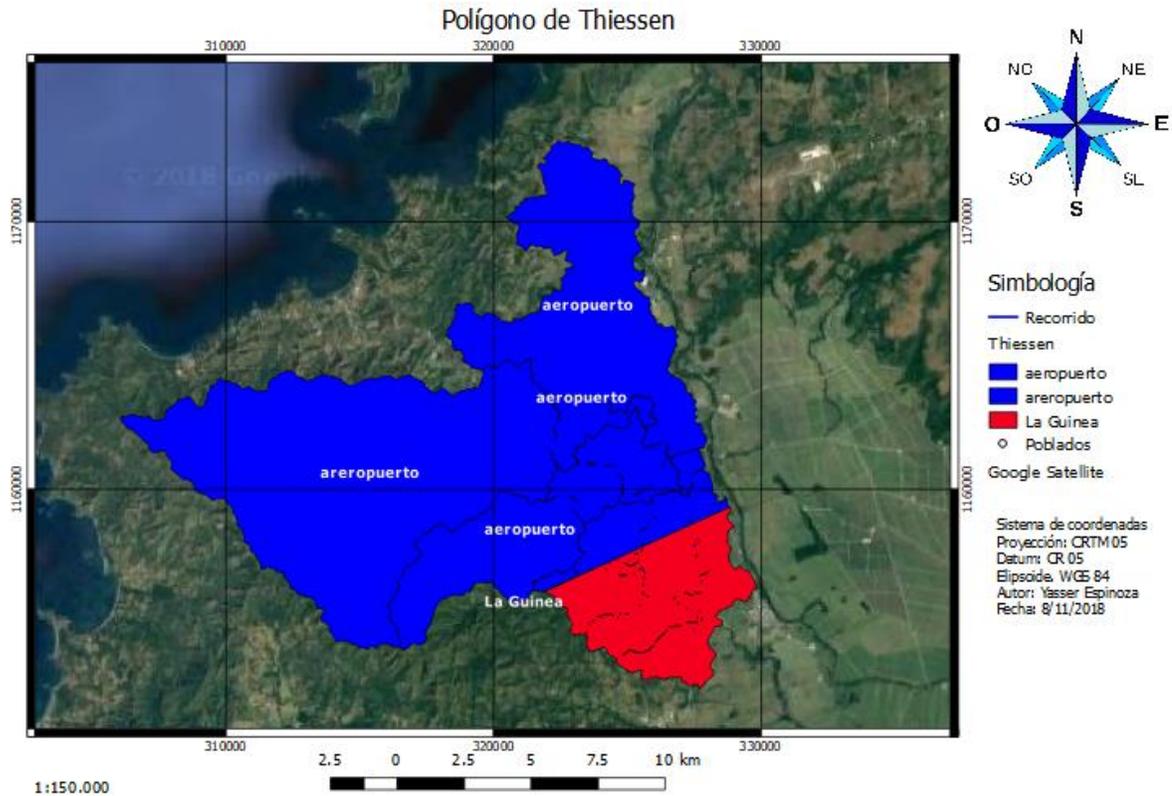


Figura 17. Polígono de Thiessen de la cuenca del río Las Palmas.

En la figura 17 se observa que las microcuencas de los ríos Sardinal, San Blas y Cuenca Alta del río Las Palmas, están dentro del polígono correspondiente a la estación del aeropuerto de Liberia, por lo que los datos de entrada al modelo hidrológico corresponden a los datos de la estación del aeropuerto con que se elaboró el hietograma de la figura 19.

Durante la tormenta Nate cayó un total de $0,4012 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de agua, en las microcuencas del río Sardinal, San Blas y la Cuenca Alta del río Las Palmas, siendo esta la causa principal de las inundaciones que se originaron, ya que las precipitaciones fueron altas en un periodo de tiempo muy corto.

En el año 2017, en la estación de Liberia se registraron un total de 2007,9 mm de lluvia, las generadas por la tormenta Nate equivalen al 19,98% de ese registro anual, este porcentaje de lluvia cayó en los días 4 y 5 de octubre.

El modelo hidrológico de la tormenta se hizo por medio del método de Número de Curva, para lo cual fue necesario relacionar los mapas de cobertura, pendiente y tipo de suelos mediante operaciones ráster y de esta forma se obtuvo el mapa que se muestra en la figura 18.

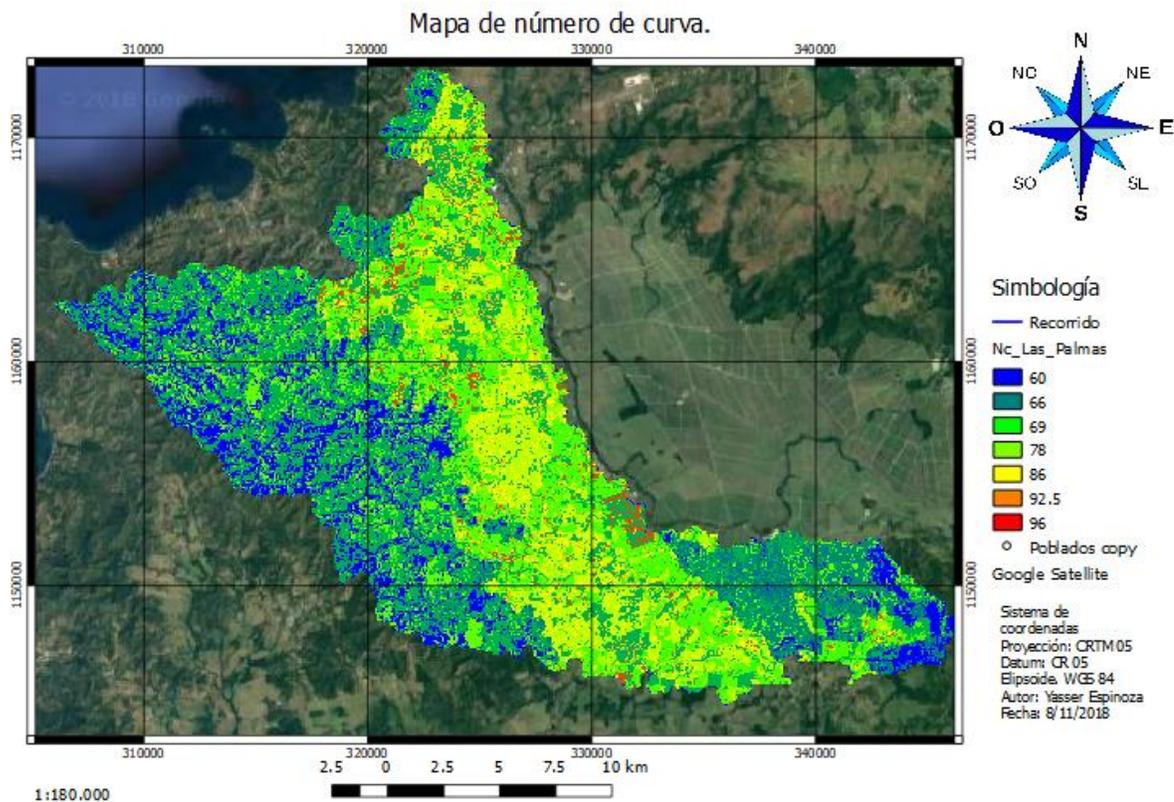


Figura 18. Número de curva de la cuenca del río Las Palmas.

El mapa de número de curva de la figura 18 se realizó para una condición hidrológica de humedad antecedente 2 y su valor fue de 73, la condición 3 se obtuvo al evaluar la ecuación 1, pero al realizar los modelos hidráulicos, los resultados de la condición 2 fueron similares a las inundaciones generadas por Nate, por este motivo en esta sección solo se discutirán los resultados correspondientes a la condición 2 y en el anexo 2 se muestran los datos de los hidrogramas para la condición 2 y 3, también se incluyen los niveles con los que se realizó el hidrograma del río Tempisque.

Para determinar los valores de números de curva de las microcuencas de los ríos Sardinal, San Blas y Cuenca Alta, se le hicieron recortes a la capa de número de curva y se obtuvo el valor correspondiente para cada una de las microcuencas.

El modelo hidrológico se realizó en el programa HEC-HMS y los datos de entrada se muestran en el cuadro 6.

Cuadro 6. Datos de entrada para elaborar el modelo hidrológico.

Cuenca	Tiempo de concentración (h)	Tiempo de retardo (h)	Número de curva (2)	Área (km ²)
Río Sardinal	4:50	2:55	70	95,823
Cuenca Alta	6:22	1:47	76	47,217
San Blas	1:47	1:10	70	31,785

El área de influencia con el que se elaboró el modelo corresponde a 43,7% del total de la cuenca del río Las Palmas, siendo el río Sardinal su mayor tributario. En la figura 19 se muestra el polígono total de la cuenca y las microcuencas de los ríos Sardinal, San Blas y Cuenca Alta del río Las Palmas.

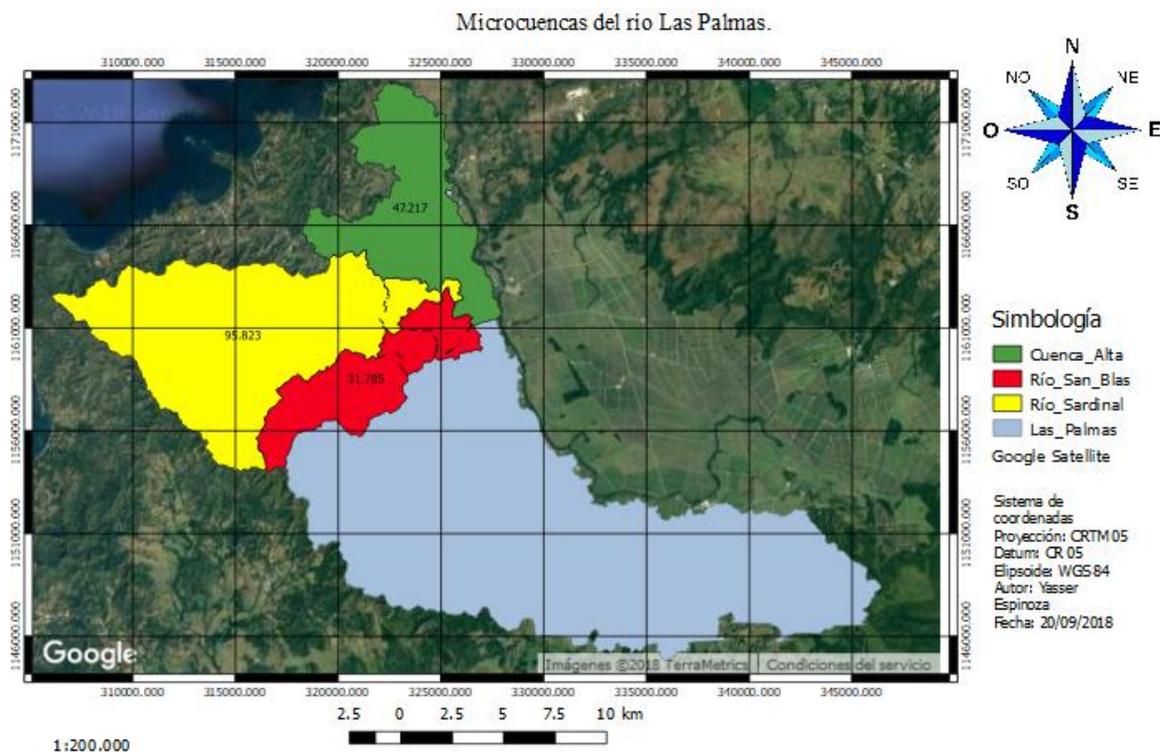


Figura 19. Microcuencas de los ríos Sardinal, San Blas y Cuenca Alta del río Las Palmas.

Al realizar el modelo hidrológico de los ríos Sardinal, San Blas y Cuenca alta del río Las Palmas, se obtuvieron los hidrogramas que se muestran en la figura 20.

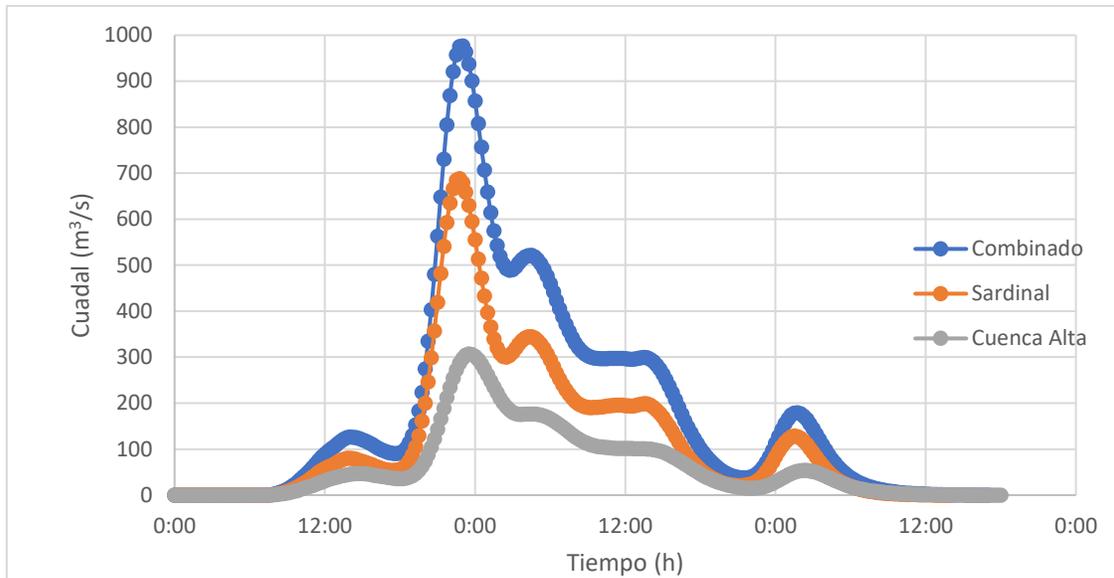


Figura 20. Hidrogramas del río Sardinal y Cuenca Alta del río Las Palmas.

En la figura 20 se observa que la tormenta Nate generó un caudal pico de 977,1 m³/s, a las 11 de la noche del 4 de octubre en la intersección de río Sardinal con la sección de la Cuenca Alta del río Las Palmas, siendo el Sardinal el de mayor aporte con un caudal pico de 688,7 m³/s.

En el caso del río San Blas la tormenta generó el hidrograma que se muestra en la siguiente 21.

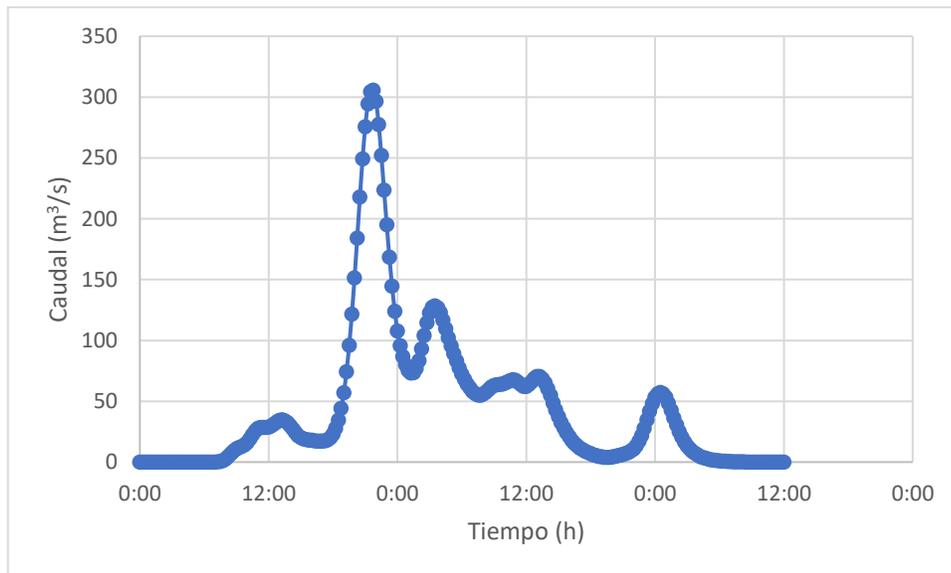


Figura 21. Hidrograma del río San Blas durante la tormenta Nate.

En el cuadro 7 se muestran los caudales picos generados por los ríos Sardinal, San Blas y la Cuenca Alta del río Las Palmas.

Cuadro 7. Caudales picos generados durante la tormenta Nate.

Río	Caudal pico (m ³ /s)	Hora a la que se presento	Fecha
Sardinal	688,7	22:45	4/10/2017
San Blas	305,7	21:45	4/10/2017
Cuenca Alta	307,1	23:30	4/10/2017

En el cuadro 7 se observan que los caudales picos que se generaron en la descarga de las microcuencas se presentaron en horas diferentes, esto se debe a que los tiempos de concentración de las microcuencas son diferentes, esta una forma práctica de considerar que tan rápido se evacuan las aguas.

7.3.2 Modelo matemático de la cuenca del río Tempisque.

Para elaborar el hidrograma que generó la tormenta Nate en el río Tempisque, fue necesario desarrollar un modelo matemático a partir de los datos de niveles proporcionados por el AyA los cuales se muestran en el anexo 2.

El modelo matemático, se realizó a partir de una modelación hidrodinámica de una sección del río Tempisque, que va de la ubicación de la estación de niveles hasta un kilómetro aguas abajo. Esta modelación permitió relacionar los siguientes factores: rugosidad, pendiente, tirante y caudales.

Con los resultados del modelo, se extrajeron los datos de como evolucionaron los tirantes y caudales del punto de donde se localiza la estación de niveles. Con estos datos se realizó una regresión, para generar el modelo matemático que permitió obtener caudales a partir de los niveles proporcionados por AyA. El modelo matemático obtenido de la regresión se muestra a continuación:

$$Q = 13,028x^2 - 52,45x + 76,159 \dots \text{Ecuación 12}$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$x = \text{Tirantes (m)}$$

La ecuación anterior presenta restricciones por ser la ecuación de una parábola y esto podría generar errores, debido a la concavidad de la parábola, la ecuación 12 es válida solo para el siguiente rango:

$$2,01 \text{ m} \leq x \leq \text{Nivel máximo de río Tempisque}$$

$x = \text{Tirantes (m)}$

De la condición anterior, el 2,01 representa al vértice de la parábola y es a partir de este punto donde la parábola es creciente. El límite superior representa el nivel máximo que puede alcanzar el Tempisque en la sección donde se ubica la estación de niveles. Es importante resaltar que para efectos de este estudio la restricción inferior no tiene relevancia, ya que el análisis se centra en los valores máximos.

La ecuación 12 se evaluó con los registros de niveles a partir de las 12 am del 4 de octubre hasta las 5 pm del día 6 de octubre del 2017. Este rango de tiempo representa el efecto de la tormenta Nate sobre el río Tempisque.

El resultado de evaluar la ecuación 12 se muestra en la figura 22.

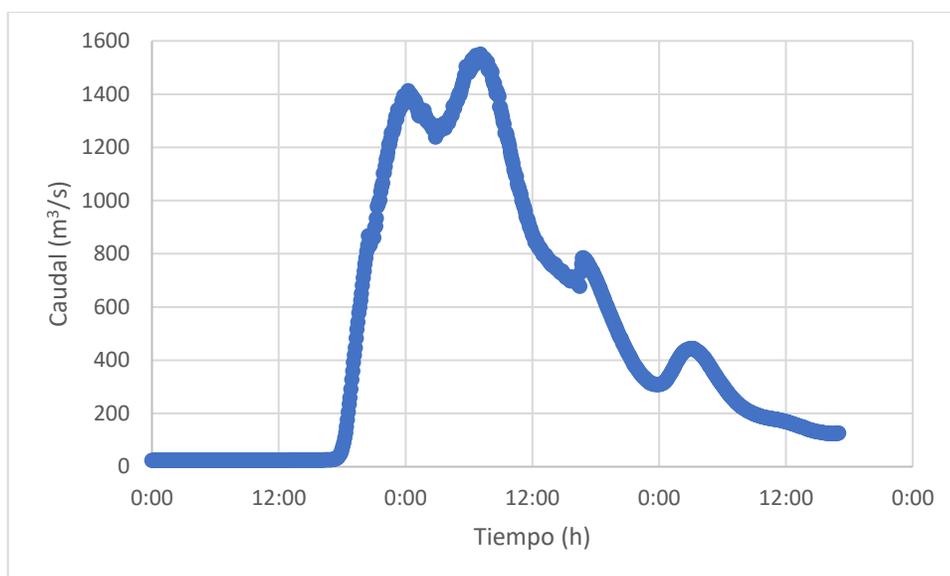


Figura 22. Hidrograma que generó la tormenta Nate en el río Tempisque.

En la figura 22 se observa que la tormenta Nate generó dos picos importantes en el río Tempisque, el primero fue de 1412,23 m³/s a las 12:15 am del día 5 de octubre y el segundo fue de 1550,57 m³/s a las 7:05 am del mismo día.

El hidrograma que generó la tormenta Nate, se observa que la curva de crecimiento para llegar al primer caudal pico, se originó entre las 4:30 pm del 4 de octubre y las 12:40 am del día 5, en este intervalo de tiempo el cauce del río pasó de transportar un caudal de 25,47 m³/s a 1412,23 m³/s. La diferencia de caudales durante este periodo de tiempo fue de 1386,76 m³/s, lo que demuestra la influencia de las precipitaciones generadas por la tormenta sobre el caudal del río Tempisque.

7.4 Modelo hidrodinámico

El modelo hidrodinámico se elaboró a partir de los registros de las precipitaciones generadas por la tormenta Nate, información topográfica extraída de la base de datos de Senara, levantamiento de secciones de las cuales no se tenía información y una nube de puntos proporcionada por el Instituto Geográfico Nacional.

Las inundaciones generadas por la tormenta Nate, son consideradas como las más importantes de los últimos años y por este motivo que, elaborar las manchas de inundación de los ríos Tempisque y Las Palmas que ocurrieron durante la influencia de la tormenta; es de mucha importancia para el proyecto Paacume, ya que servirán como base técnica para determinar posibles obras de protección o cambios en la red de canales.

Como parte de los resultados del modelo hidrodinámico fue necesario generar información previa para realizar la base geométrica, está básicamente consiste en generar una geometría que esté formada por los diferentes tipos de coberturas, para realizar la asignación del número de Manning correspondiente a cada uso de suelos. Cabe destacar que esta información presenta limitaciones las cuales se abordarán más adelante.

7.4.1 Limitaciones

Los resultados que se analizarán, parten del supuesto que la información topográfica extraída de las bases de datos de Senara y la nube de puntos proporcionada por el Instituto Geográfico Nacional coinciden con las condiciones actuales de los cauces de los ríos Las Palmas y Tempisque.

Es importante resaltar que la mayoría de las secciones transversales del río Las Palmas fueron levantadas a 25 o 50 metros de distancia entre sí, en otras zonas fue necesario interpolar secciones, ya que estas se encontraban separadas a más de un kilómetro. En el caso del río Tempisque solo se disponían de 25 secciones transversales en los 25 kilómetros del cauce que se evaluaron; algunas de estas secciones estaban separadas hasta por 2 kilómetros, por lo que fue necesario interpolar secciones para poder darle forma al cauce.

7.4.2 Geometría base

La geometría se realizó en función de los tipos de cobertura, calidad de resultados que se requirieren según el tamaño de malla, contemplado el relieve del área, ancho de los cauces y zonas de especial importancia.

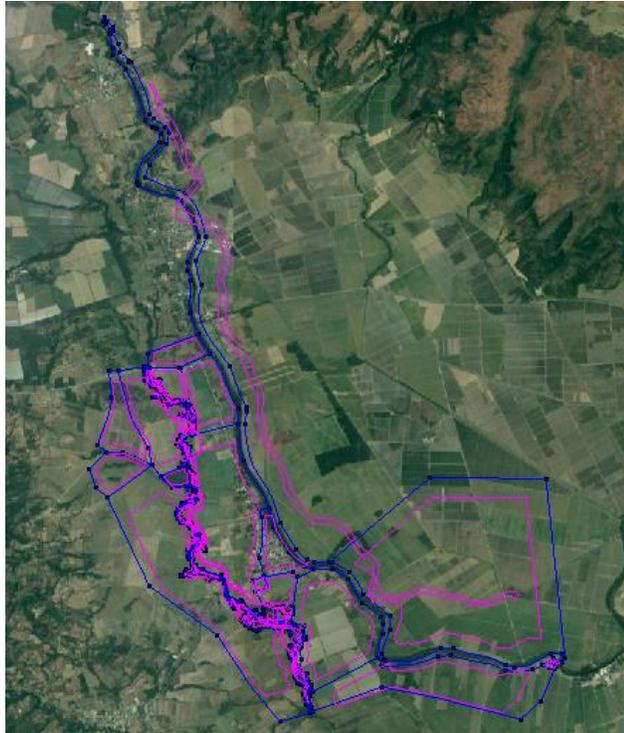


Figura 23. Base geométrica para la modelación.

7.4.3 Asignación de uso coeficiente de rugosidad de Manning.

La asignación del número de Manning se realizó en función del tipo de cobertura.

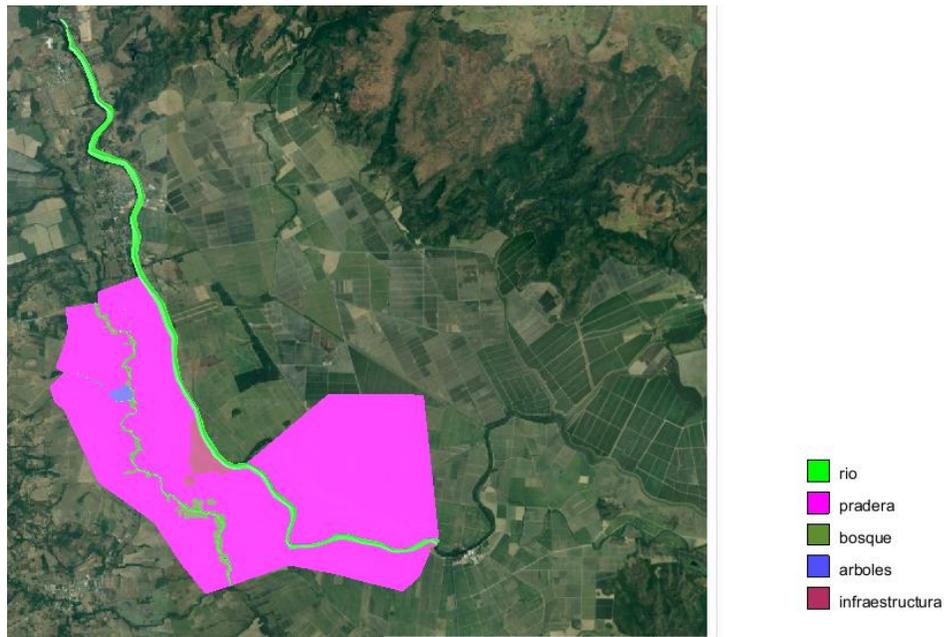


Figura 24. Asignación del número de Manning para los diferentes tipos de cobertura.

7.4.4 *Tamaño de mallado*

Se uso un mallado no estructurado, ya que permite ser usada en áreas irregulares.

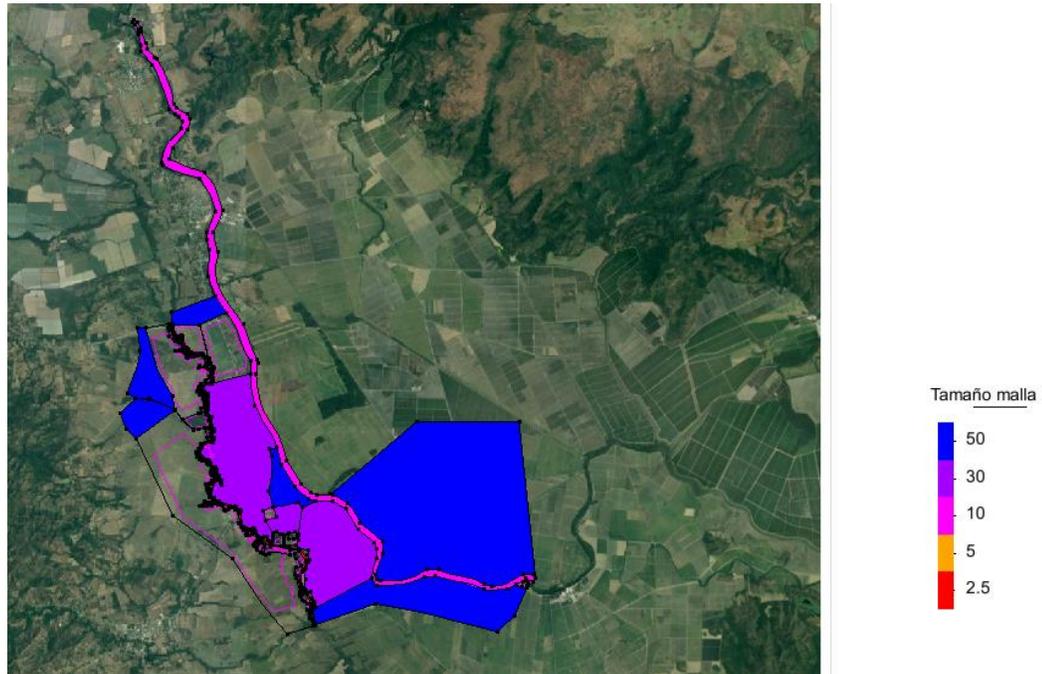


Figura 25. Distribución del mallado.

7.4.5 *Asignación de elevaciones*

La asignación de elevaciones se hizo de forma automática, tomando los valores de un archivo raster en formato ASCII, el cual tiene valores numéricos asociados a posiciones geográficas y elevaciones.

7.4.6 *Resultados del modelo hidrodinámico*

En la figura 26 se muestra los niveles máximos generados con el modelo hidrodinámico, cabe destacar que este comportamiento fue similar al registrado durante la tormenta.

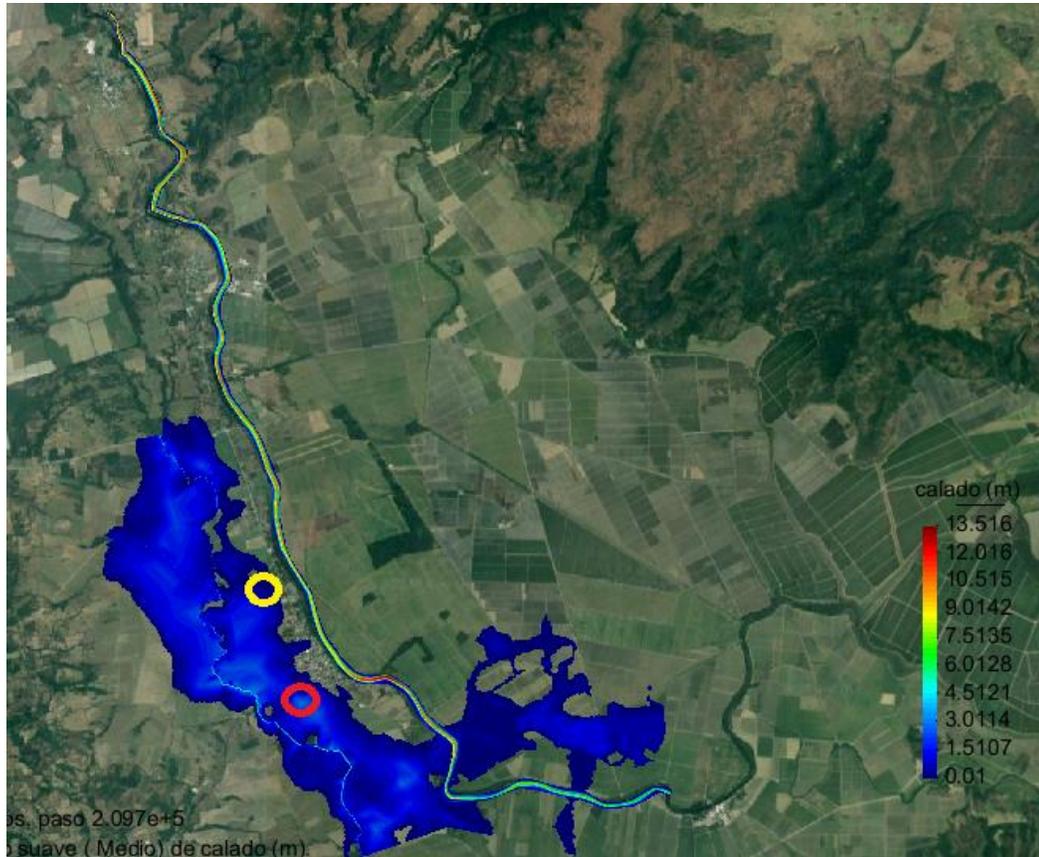


Figura 26. Tirantes máximos generados con el modelo hidrodinámico.

En la figura 26 se observan los niveles que pudieron alcanzar las manchas de inundación a raíz de la tormenta Nate. Las zonas señaladas con los círculos representan la ubicación de barrió Bambú (rojo) y una pista de aterrizaje (amarillo) localizada al frente de la entrada principal a Filadelfia, estos puntos servirán como referencia en la sección de verificación del modelo.

En la figura 26, se observa que las inundaciones que afectaron Filadelfia fueron ocasionadas por el desbordamiento del río Las Palmas.

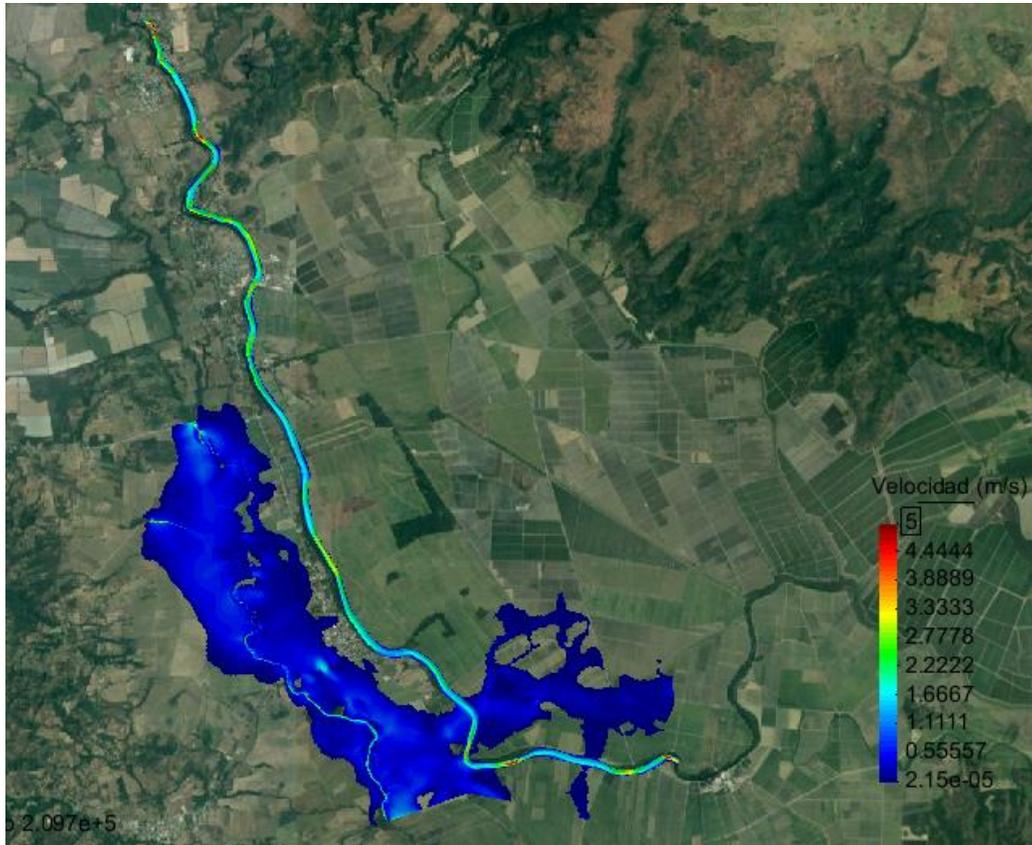


Figura 27. Velocidades máximas generadas con el modelo hidrodinámico.

En la figura 27 se observa que las velocidades fueron inferiores a los 5 m/s y las máximas se presentaron en el cauce del tempisque. Los valores de velocidades obtenidos son congruentes con el comportamiento de estos ríos, ya que estos al desbordarse avanzan lentamente debido a las condiciones topográficas.

Al extraer los niveles máximos que alcanzaron las manchas de inundación de los ríos como una capa raster, fue posible identificar las secciones de la red de canales del proyecto Paacume que pudieran ser afectados en caso de ocurrir un evento similar a Nate cuando estos estén operando. En la figura 28 se muestra la posible ubicación de parte de la red de canales del proyecto Paacume.

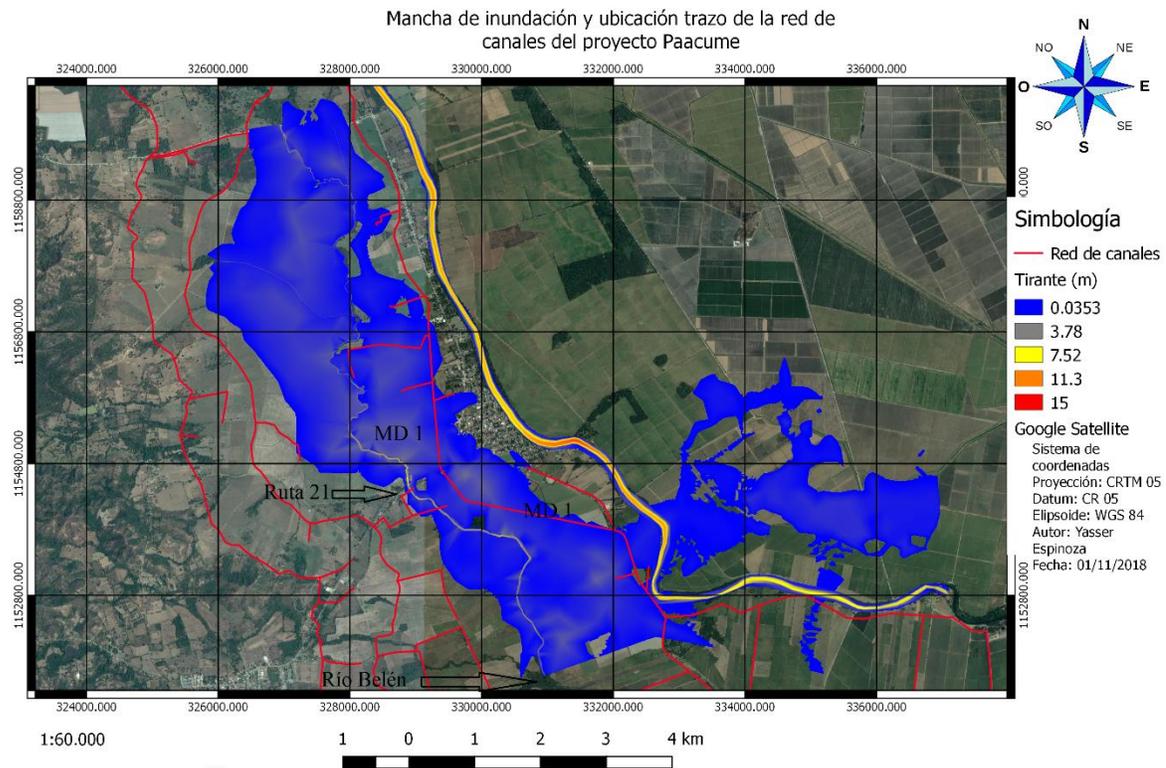


Figura 28. Secciones de la red de canales del proyecto Paacume y manchas de inundación generadas con el modelo hidrodinámico.

En la figura 28 se observa que la sección de canales (MD 1) que iría paralela a la ruta 21, posiblemente sería afectada por un evento similar a la tormenta Nate. Esta misma sección también sería afectada incluso después de atravesar la ruta 21 con dirección al ingenio El Viejo.

En la figura 28, también se puede observar que la red de canales que se construiría en la margen derecha del río Las Palmas, no presentaría afectación por eventos similares a Nate hasta el cruce con la ruta 21, ya que su trazado se realizó en cotas superiores a las zonas que se inundan. Con el modelo elaborado no fue posible determinar si la sección que iría de la Ruta 21 hacia el río Belén, sufrirá afectación ante un evento similar a Nate, ya que no se tiene información del cauce del río Belén y sus alrededores

Se logró determinar el nivel que alcanzaría el agua por las zonas que serían afectadas por eventos similares a Nate, para esto se elaboraron 2 perfiles del nivel del agua que corresponden a los trazos por donde pasarían los canales del proyecto Paacume. En la figura

29 se muestran los trazos de la red de canales del proyecto Paacume con que se elaboraron los perfiles.

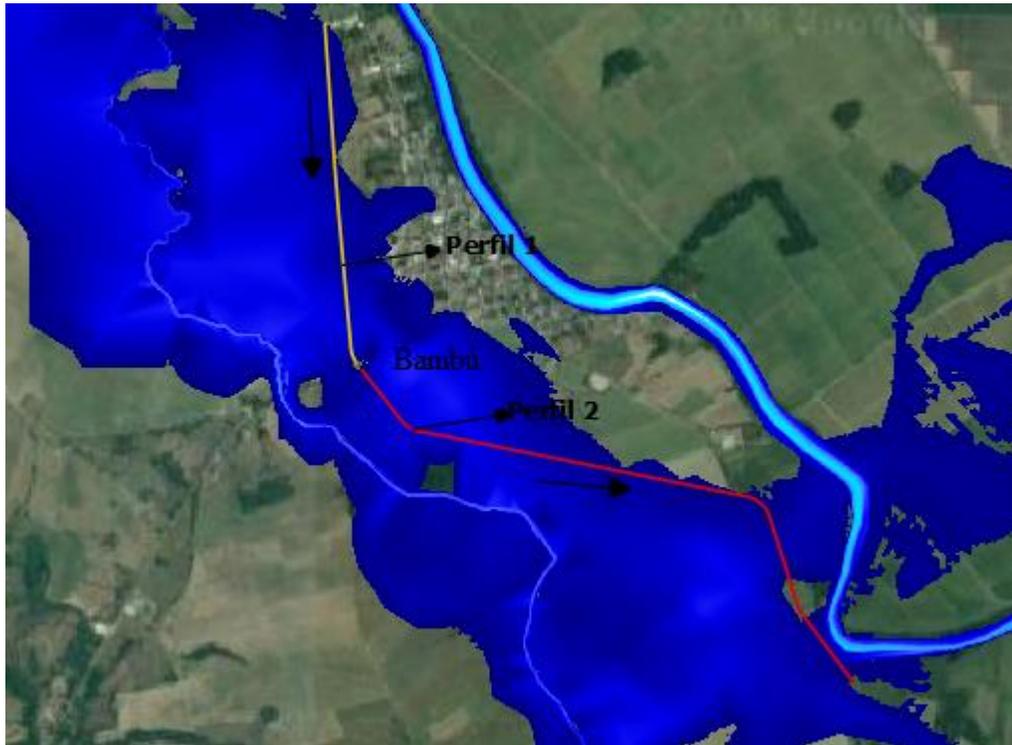


Figura 29. Trazos con que se elaboraron los perfiles.

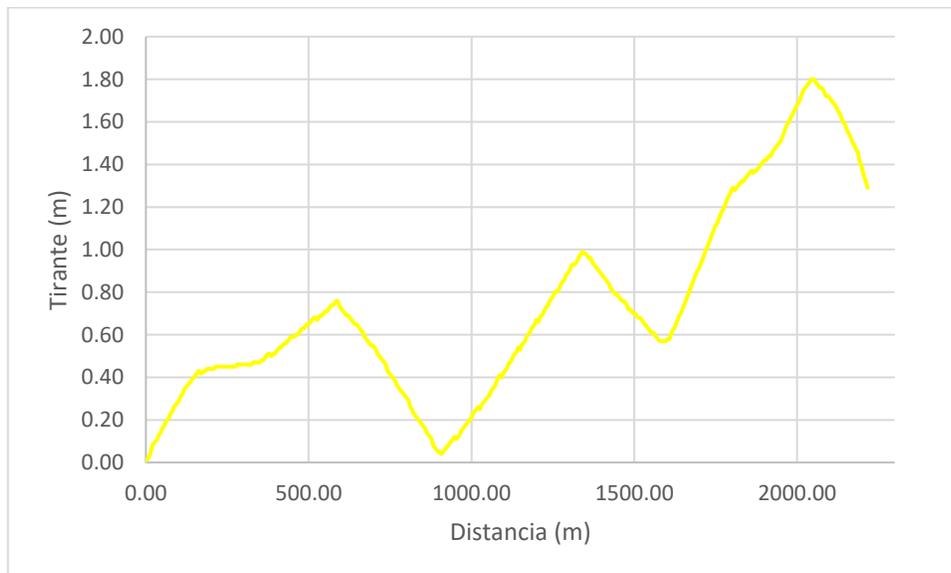


Figura 30. Perfil 1.

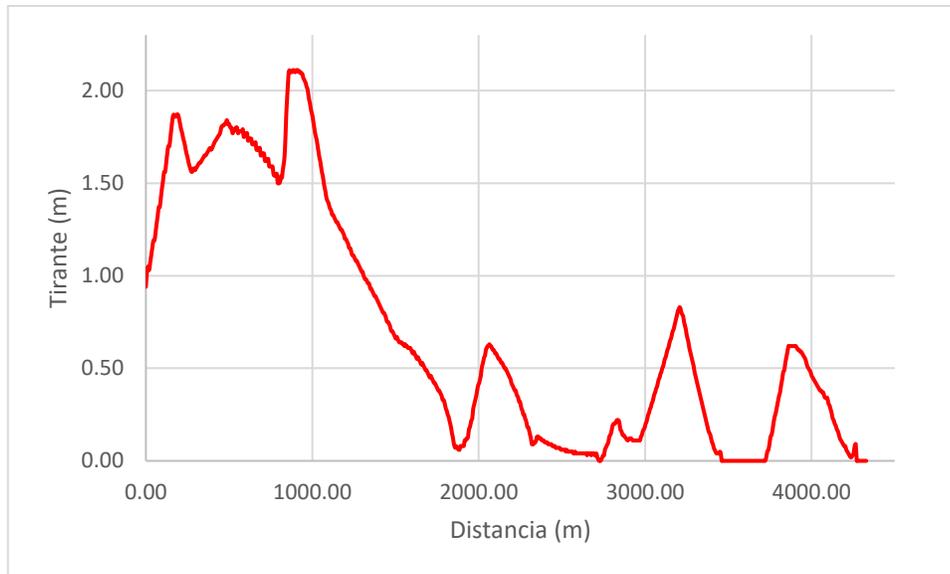


Figura 31. Perfil 2.

El nivel promedio que pudo alcanzar el agua durante la tormenta Nate, fue de 0,74 m en el tramo correspondiente al perfil 1 y 0,70 m en el tramo correspondiente al perfil 2.

En las 30 y 31, se muestra que las precipitaciones provocadas por la tormenta Nate ocasionaron que el nivel del agua llegara a alcanzar los 2 metros, en la sección del canal que pasa cerca del barrio Bambú; esta situación podría comprometer la integridad del canal, ya que se podría generar acumulación de sedimentos, debido a que las velocidades que se obtuvieron en esa zona fueron inferiores a 1 m/s.

7.4.7 Causa principal de las inundaciones generadas por Nate

La tormenta Nate generó más de 400 mm de lluvia en 2 días en diferentes zonas de Guanacaste, siendo esta la principal causa de las inundaciones que ocurrieron los días 4 y 5 de octubre.

Las inundaciones que afectaron a la comunidad de Filadelfia fueron accionadas por el desbordamiento del río Las Palmas, ya que el cauce principal no tuvo la capacidad para evacuar las aguas provenientes de sus tributarios lo que generó el desbordamiento del río.

En el caso del Tempisque se observó que aguas arriba de la comunidad de Filadelfia no se desbordó, pero al llegar a la sección que está encerrada con un círculo en la figura 32, el río si superó la capacidad de su cauce; es posible que el desbordamiento del río en esta sección se deba al efecto de los cambios de dirección del cauce, lo que genera una especie de remanso.



Figura 32. Tramo donde el río Tempisque se desbordó.

Con la información de tirantes máximos generados con el modelo hidrodinámico, fue posible determinar los niveles máximos que alcanzó el agua en algunas secciones del río Las Palmas. En el caso del tempisque solo se extrajo la información de secciones donde el río se desbordó.

En la figura 33 se muestra en amarillo, enumerado del 1 al 5, la ubicación de las secciones transversales extraídas del modelo hidrodinámico del cauce del río Las Palmas. En rojo y con numeración del 6 al 9, la ubicación de las secciones donde el río Tempisque se desbordó.

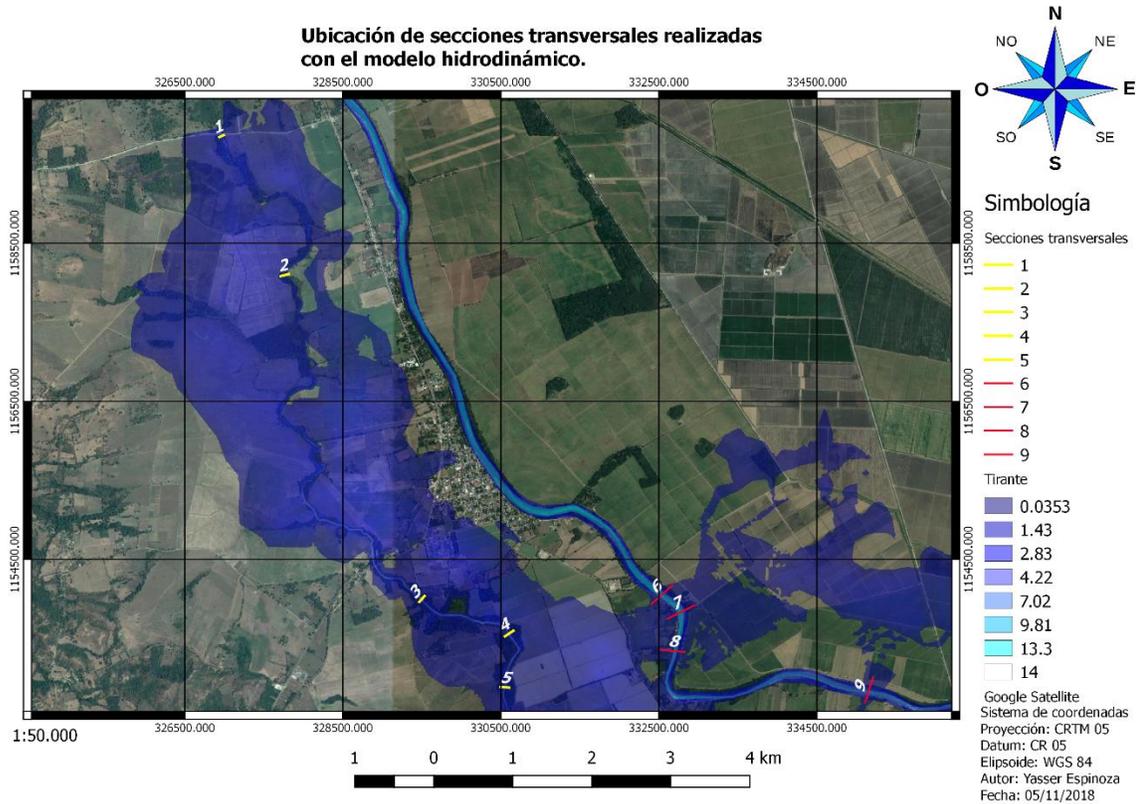


Figura 33. Ubicación de secciones transversales realizadas con el modelo hidrodinámico.

Las secciones transversales se incluyen en el anexo 1 y corresponden a las figuras enumeradas de la 46 a 54, siendo las primeras 5 cortes transversales del río Las Palmas y las últimas 3 pertenecen al río Tempisque.

De las secciones transversales correspondiente al río Las Palmas, se logra observar que el nivel del agua llegó a alcanzar un nivel de casi 2 metros sobre el borde del río, además se presentaron secciones como la que se muestra en la figura 47, donde el río solo logró superar la margen derecha, esta condición hizo que las manchas de inundación de margen derecha fueran mayores en unas zonas.

En el caso de las secciones del río Tempisque, se observa que la ubicación de la sección número 7, representa la zona donde el río logró desbordarse por ambas márgenes con mayor facilidad.

7.5 Validación de resultados

La validación de los resultados obtenidos es de mucha importancia para este proyecto, ya que podría ser usado como base técnica para realizar obras de protección a la red de canales

del proyecto Paacume o realizar cambios en los sistemas de conducción en las secciones que serían afectadas por eventos similares a la tormenta Nate.

Como parte del proceso de validación se recolectó una serie de imágenes de diferentes puntos que fueron afectados por las inundaciones, además fue posible observar en los árboles ubicados cerca del cauce que evidencia del nivel que pudo alcanzar el río durante la tormenta.

La verificación de los resultados se realizará en dos etapas, la primera consistirá en comparar los registros de las manchas de inundación generadas por la tormenta y las obtenidos con el modelo hidrodinámico. En la segunda se compararán los niveles que alcanzaron las inundaciones en algunos puntos y los generados con el modelo hidrodinámico.

7.5.1 Comparación de manchas de inundación

Para realizar la comparación de las manchas de inundación, se tomará como evidencia física, las imágenes captadas con un Drone el día 5 de octubre en horas de la tarde y esta se comparan con los resultados del modelo hidrodinámico.

Durante la tormenta Nate no se registró afectación en ninguna de las márgenes del río Tempisque a la altura de Filadelfia, este mismo comportamiento se obtuvo con el modelo hidrodinámico. En la figura 35 se muestra la comparación entre la imagen captada por Saul Cárdenas con un Drone (izquierda) y una imagen extraída del modelo hidrodinámico.



Figura 34. Comportamiento del río Tempisque a la altura de Filadelfia.

Aguas abajo de donde termina el dique que protege a Filadelfia, el río Tempisque se desbordó por ambas márgenes durante la tormenta Nate, esto quedó registrado en las imágenes tomadas con el Drone. Este mismo comportamiento se obtuvo con los resultados del modelo hidrodinámico.



Figura 35. Comportamiento del río Tempisque a la altura de Filadelfia.

Según algunos habitantes de la comunidad de La Guinea y sus alrededores, durante la tormenta Nate los ríos Tempisque y Las Palmas llegaron a formar una sola corriente de agua dejándolos incomunicados. De este lapso de tiempo no se tienen registros físicos como para corroborar lo expresado por las personas entrevistadas, pero las imágenes captadas con el Drone parecieran confirmar lo expresado por las personas.

Al comparar las manchas de inundación aguas abajo de la Ruta 21, se observó gran similitud entre las imágenes captadas con el Drone y las generadas con el modelo hidrodinámico, esto se puede observar en la siguiente figura.



Figura 36. Manchas de inundación aguas abajo de la Ruta 21.

El barrio Bambú, fue una de las zonas urbanas más afectadas por la tormenta Nate, inundándose en su totalidad, esto quedó registrado en imágenes aéreas y terrestres; este mismo comportamiento, también se obtuvo con el modelo hidrodinámico. (Ver figura 38)



Figura 37. Barrio Bambú durante la tormenta Nate y manchas de inundación generadas con el modelo hidrodinámico.

Como parte de la validación del modelo hidrodinámico, se entregará junto a este documento el video tomado con el Drone por Saul Cárdenas y el extraído del modelo hidrodinámico, ya que en este documento solo se muestran algunas zonas y comparando los videos se puede observar que el comportamiento de las manchas de inundación fue similar en otras zonas que fueron afectadas por la tormenta Nate.

7.5.2 Comparación de niveles en diferentes puntos.

Para validar los niveles se hicieron entrevistas a personas que fueron afectadas por las inundaciones y durante el levantamiento de las secciones del río Las Palmas, se obtuvo evidencia de hasta donde pudo haber llegado el nivel del agua. En la figura 39 se muestra la ubicación de los puntos usados para validar los niveles.

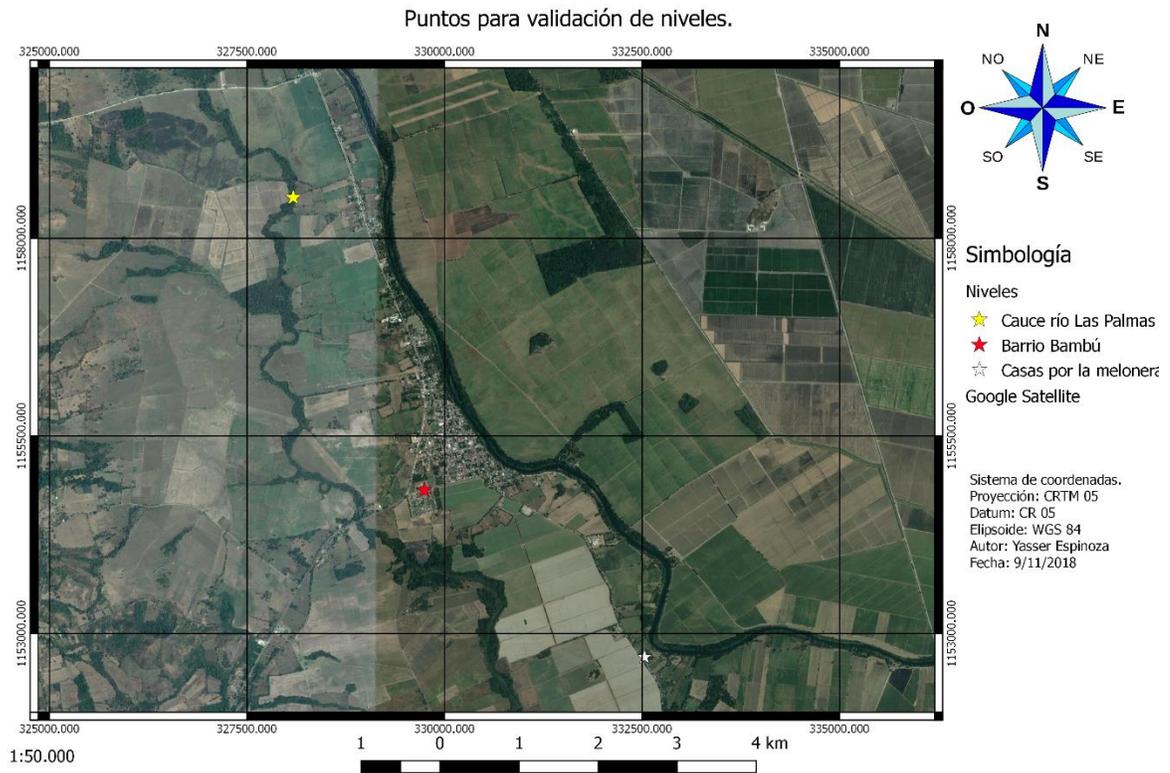


Figura 38. Puntos de referencia para validad niveles.

Durante el levantamiento de las secciones del cauce del río Las Palmas se trató de buscar algún tipo de marca o señal que sirviera como evidencia del nivel que había alcanzado el agua en el cauce durante la tormenta Nate. Parte de la evidencia que se recolectó durante el recorrido del cauce fueron las fotografías que se muestran en la figura 40.



Figura 39. Tronco sobre las ramas de un árbol en el cauce del río Las Palmas.

En la figura 40 se muestra un tronco que quedó sobre las ramas de un árbol que está ubicado en el cauce del río Las Palmas. El tronco estaba localizado a una altura de 2,95 m sobre el fondo del cauce, al extraer del modelo hidrodinámico la evolución del tirante en las coordenadas donde estaba localizado el tronco se obtuvo que el tirante máximo en esa posición fue de 2,91 m y su evolución se muestra en la siguiente figura.

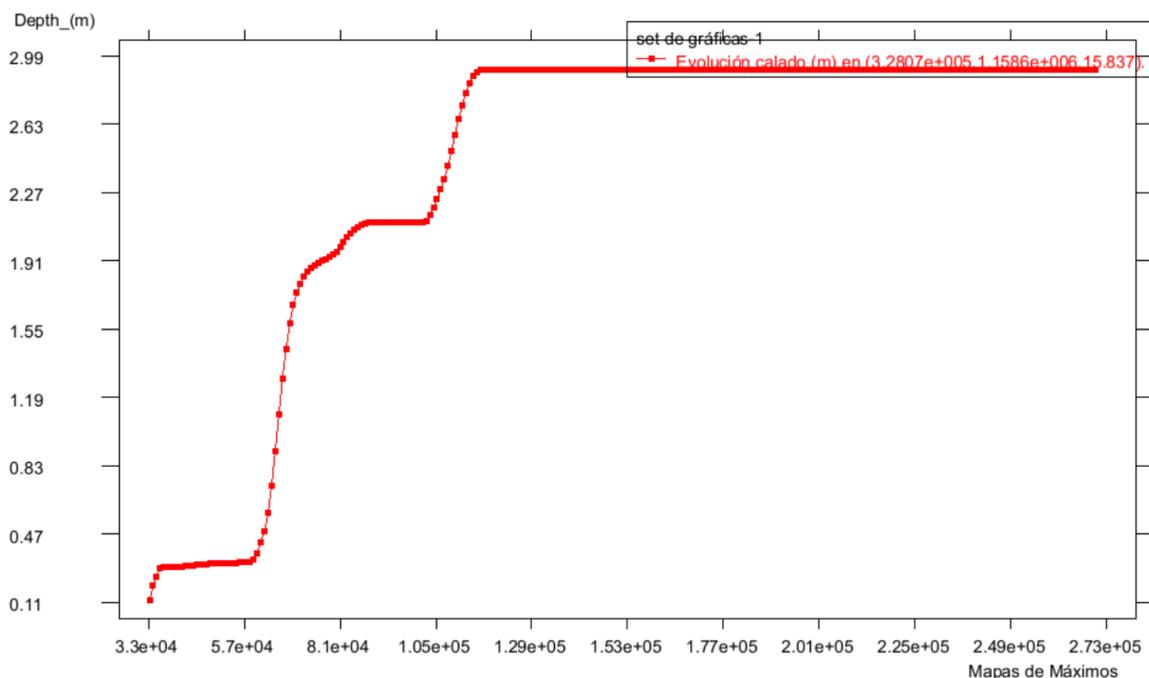


Figura 40. Evolución del tirante en las coordenadas donde estaba ubicado el tronco.

Como segundo punto de referencia se consultó a algunos habitantes del barrio Bambú sobre el nivel máximo que ellos lograron observar durante la crecida y como punto de referencia en este barrio se seleccionó el nivel señalado por Pedro Camacho (figura 42) vecino del barrio Bambú.



Figura 41. Nivel máximo que alcanzó el agua en el interior de la casa de habitación de la persona de la foto.

Según Pedro Camacho, el nivel máximo que alcanzó el agua en su casa de habitación durante la tormenta Nate, estuvo entre los 1,60 y 1,70 m. El tirante máximo obtenido en el modelo hidrodinámico en las coordenadas donde se ubica la casa fue de 1,71 m y su evolución se muestra a continuación.



Figura 42. Evolución del tirante en las coordenadas donde está ubicada la casa usada como referencia en el barrio Bambú.

Como último punto de referencia se entrevistó a personas que habitan en el caserío que se ubica cerca de la melonera (Estrella blanca de la figura 39), según lo expresado por estas personas, en esa zona hubo afectación por parte de los ríos Tempisque y Las Palmas. A pesar de haber sido afectados por los dos ríos, los tirantes en esta zona no superaron el metro.

Como evidencia se seleccionó las paredes frontales de una casa, ya que, según los dueños, la pintura de las paredes hasta donde llegó el nivel del agua se empezó a caer después de la tormenta, esto observa en la figura 44.



Figura 43. Marcas hasta donde llegó el agua durante la tormenta Nate.

De la figura 44 se observa las marcas hasta donde llegó el nivel del agua durante la tormenta Nate. La altura del agua pudo estar entre los 15 y los 20 cm; el valor máximo obtenido con el modelo fue de 21,4 cm y la evolución de los tirantes se muestra en la figura 45.

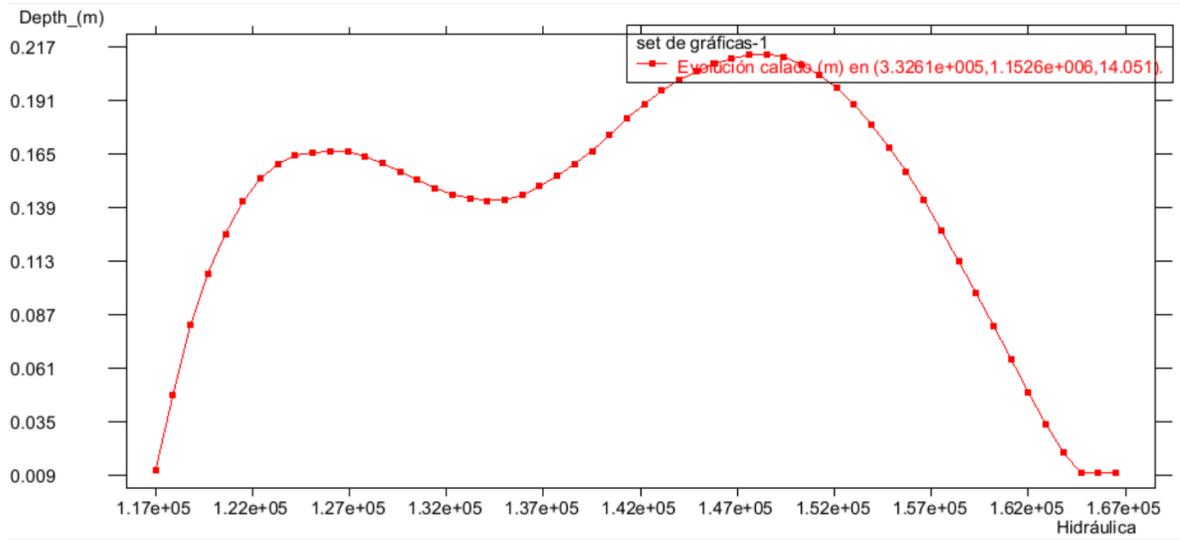


Figura 44. Evolución del tirante en la casa usada como referencia cerca de la melonera.

En ninguno de los puntos de referencia se logró obtener un valor exacto, esto probablemente se debe a la calidad de los datos topográficos con los que se generó el modelo de elevación

8 Conclusiones

Para las precipitaciones generadas por la tormenta Nate, se determinó que el número de curva que mejor se ajusta para la transformación de precipitación a caudales en la cuenca del río Las Palmas, corresponde a una condición hidrológica de humedad antecedente dos (CHA II) y su valor es de 73.

En el caso del río Tempisque, se determinó que la ecuación que mejor relaciona los tirantes con caudales corresponde a una ecuación cuadrática con un coeficiente de correlación de 0,9984; para usar esta ecuación se deben considerar las restricciones, ya que podrían generar errores en caso de usar valores que estén fuera del rango para el cual la ecuación funciona bien.

Al realizar el análisis hidrológico se determinó que las precipitaciones generadas por la tormenta Nate corresponden para un periodo de retorno de 50 años y que el cauce del río Las Palmas no tiene la capacidad de conducir los 1281,5 m³/s que podrían generar por influencia de las microcuencas de los ríos Sardinal, San Blas y Cuenca Alta del río Las Palmas.

La estación de niveles del AyA registró un tirante máximo del río Tempisque de 12,84 m, al relacionar este valor con el modelo matemático, se obtuvo que en ese instante el caudal que pasó por la sección donde se ubica la estación de niveles pudo ser de 1550,57 m³/s.

En el trayecto del río Tempisque que va de la intersección del río con la Ruta 21 hasta donde finaliza el dique que protege a la comunidad de Filadelfia, el río tiene capacidad para conducir caudales generados por eventos similares a Nate.

La validación del modelo hidrodinámico se realizó en dos etapas, la primera consistió en comparar las manchas de inundación generadas con el modelo hidrodinámico con las registradas en el video tomado con el Drone el día 5 de octubre en horas de la tarde. La segunda consistió en comparar los niveles registrados durante las inundaciones y los niveles obtenidos con el modelo hidrodinámico. Al comparar las manchas de inundación, se observó que el comportamiento obtenido con el modelo hidrodinámico fue similar al registrado con el video tomado el día 5 de octubre. En el caso de los niveles, solo se tenía referencia de tres puntos localizados en tres lugares diferentes. Al compararlos con los generados con el modelo hidrodinámico, se obtuvo que en el primer punto de referencia la diferencia fue de 4 cm, en el segundo la diferencia pudo ser menor a los 10 cm y en el último punto la diferencia pudo ser inferior a los 6 cm.

9 Recomendaciones

Realizar un estudio hidrológico, donde se contemple los datos de estaciones meteorológicas privadas o de otras estaciones que tiene el IMN en la zona de estudio.

Considerar realizar un estudio topográfico con mayor detalle, de manera que se obtenga un modelo de elevación digital que se ajuste mejor a las condiciones del terreno de la zona de estudio.

Ampliar el levantamiento topográfico, de manera que sea posible realizar un modelo de elevación que abarque toda el área de cobertura de la red de canales del proyecto Paacume.

Aumentar los puntos de referencia de los niveles que alcanzaron las inundaciones ocasionadas por la tormenta Nate para tratar de calibrar mejor el modelo hidrodinámico.

10 Bibliografía

- Arguedas O, D. (3 de Junio de 2015). La provincia de los pozos secos. *SEMANARIO UNIVERSIDAD*.
- Barquero, M. (25 de Julio de 2013). Producción agropecuaria de Guanacaste pretende surgir con demanda hotelera y exportaciones. *La Nación* .
- Barrera, D. (2006). El perímetro de una cuenca hídrica: Su tratamiento objetivo en la definición de índices geomorfológicos. . *El perímetro de una cuenca hídrica: Su tratamiento objetivo en la definición de índices geomorfológicos*. . Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina: Editorial EUDEBA.
- Cengrl, Y., & Cimbala , J. (2006). *Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones*. México DF: McGraw-Hill/Interamericana.
- Chinchilla, D. (06 de Octubre de 2017). Ríos aíslan 400 personas en Guanacaste. *La Extra*.
- Ferreya, A. (2016). La observación de la tierra desde el espacio. Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Guzmán, I., Watson , F., Villagra , K., & Casasol, R. (2017). *Modelación Hidrodinámica y Morfológica del Río La Estrella, Limón*. Cartago.
- Hinojosa, J. (1987). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en cuencas naturales pequeñas*. . Madrid : Alanmer.
- INEC. (2015). *Anuario Estadístico 2012 - 2013*. San José .
- López, J. (07 de Junio de 2008). CNE comenzó dragado de río Las Palmas. *La Nación* .
- Martínez, J. (13 de Agosto de 2018). Inundaciones causadas por el río Tempisque en la comunidad de La Guinea . (R. Espinoza, Entrevistador)
- Martínez, M., & Fernández, D. (2015). *Hidrología aplicada a las pequeñas obras hidráulicas* . México: Unidad Técnica Especializada (UTE) COUSSA.
- Meza, D. (2010). *Análisis morfométrico de las cuencas de la red MEX-LTER: Estudio de diez cuencas a nivel nacional en México*. Guadalajara.
- Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos. El Caso del Delta del Río Ranchería, R.-C. (04 de Agosto de 2018). *Scielo*. Obtenido de Scielo: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642018000400143

- Ollero, A. & V.-B. (Octubre de 2011). Indicadores geomorfológicos para el seguimiento de la restauración fluvial. León, Le'on, España .
- Parra, F., & Muñoz, J. (9 de Junio de 2014). Dinámica ambiental y económica en la localidad de Puente Aranda en Bogotá. *Dinámica ambiental y económica en la localidad de Puente Aranda en Bogotá*. Bogotá, Colombia.
- Pérez, J. (04 de Ago de 2018). *Scielo*. Obtenido de Scielo: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642018000400143
- Recio, P. (25 de Julio de 2017). Agua no alcanza para el desarrollo en Guanacaste. *La Nación* .
- Retana, J., & Solano, J. (2005). *Relación entre las inundaciones en la cuenca del río Tempisque* . San José.
- Rodríguez, S. (20 de Julio de 2018). *Ojo al clima* . Obtenido de Ojo al clima : <https://ojoalclima.com/las-cicatrices-despues-de-nate-en-corrallillo-guanacaste/>
- Ruíz, M. (Junio de 2017). Solución numérica de la ecuación vectorial de Saint-Venant utilizando métodos. *Solución numérica de la ecuación vectorial de Saint-Venant utilizando métodos*. Michuacán, México .
- Senara. (03 de 06 de 2018). *Senara*. Obtenido de Senara: <http://www.senara.or.cr/proyectos/paacume/piaag.aspx>
- Soto, M. (1 de Abril de 2014). Costa Rica ya lidia con los efectos del cambio climático. *La Nación* .
- Soto, M. (29 de Octubre de 2015). Época lluviosa en Guanacaste sería la más corta en un siglo. *La Nación* .
- Strahler, A. (4 de 2 de 2011). Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of erosional topography. *Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of erosional topography*. Geological Society of America Bulletin.
- Vallejos, S., Esquivel , L., & Hidalgo, M. (2017). Eventos Hidrometeorológicos. *Histórico de Desastres en Costa Rica* , 27-28.
- Vélez , J., & Botero , A. (2010). *Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales*. San Luis: .

Villalobos, W. (11 de 05 de 2017). *La Voz de Guanacaste* . Obtenido de La Voz de Guanacaste : <https://vozdeguanacaste.com/inundaciones-obligan-a-abrir-albergues-y-cerrar-rutas-en-guanacaste/>

Villón, M. (2015). *Hidrología* . Cartago : Editorial Tecnológica de Costa Rica .

11 Anexo

11.1 Anexo 1. Cortes transversales de los ríos Las Palmas y Tempisque.

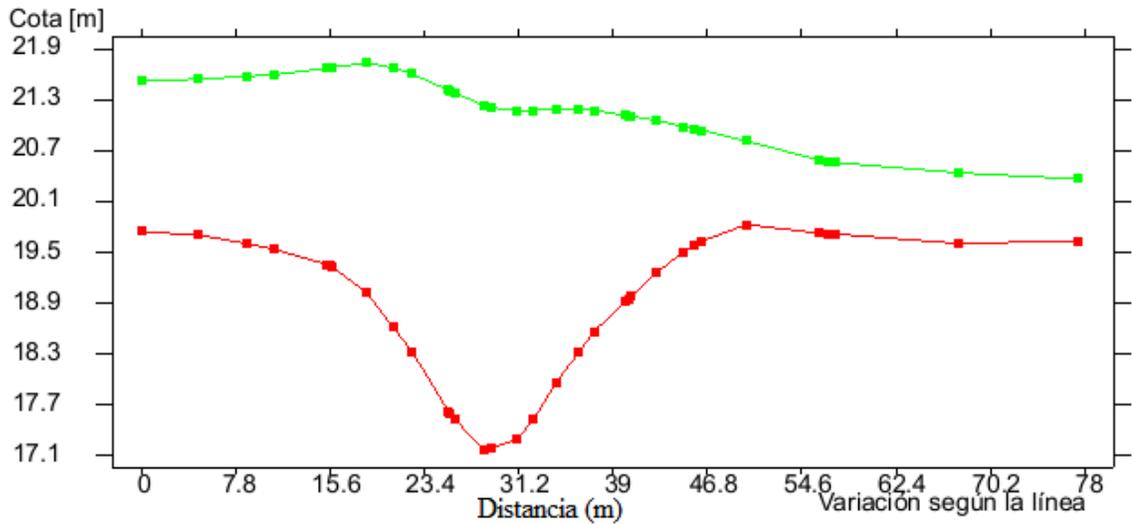


Figura 45. Sección transversal río La Palmas número 1.

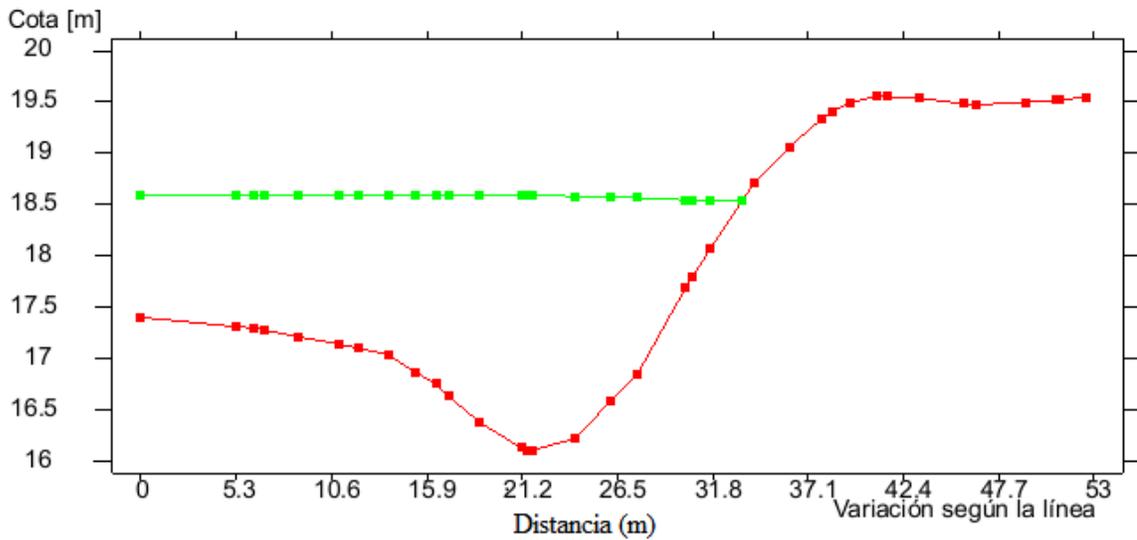


Figura 46. Sección Transversal río Las Palmas número 2.

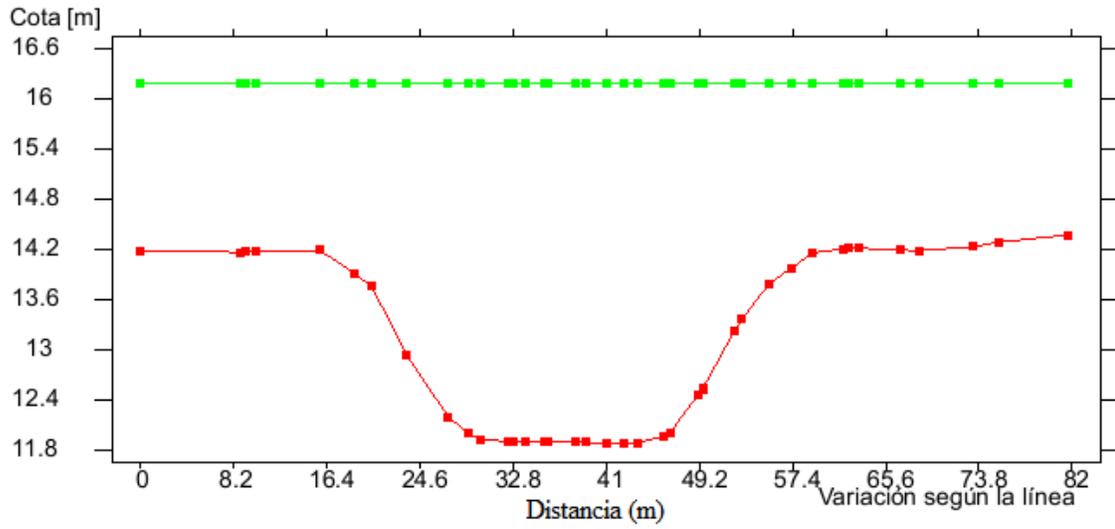


Figura 47. Sección Transversal río Las Palmas número 3.

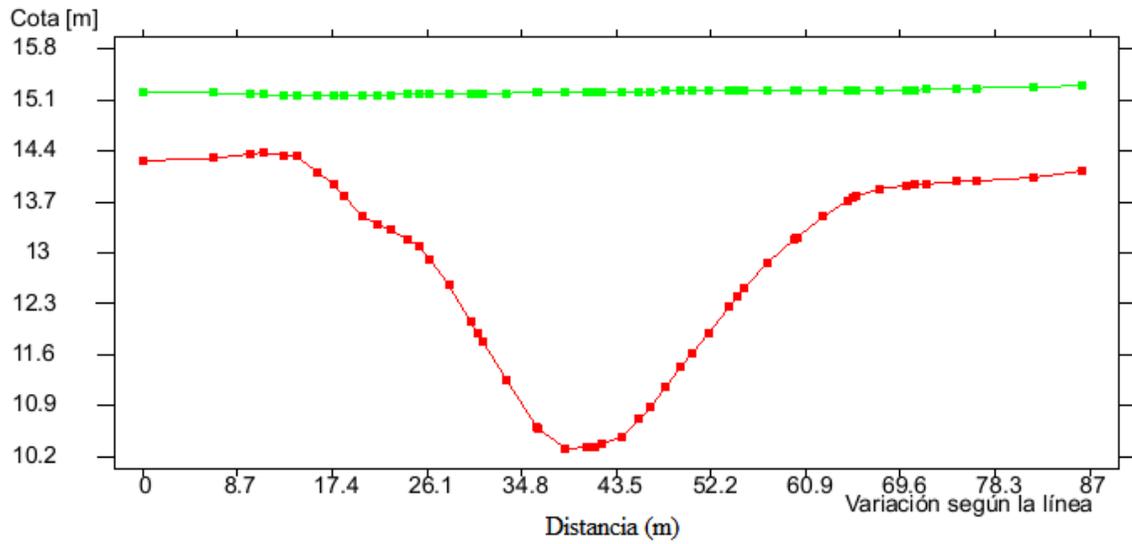


Figura 48. Sección transversal río Las Palmas número 4.

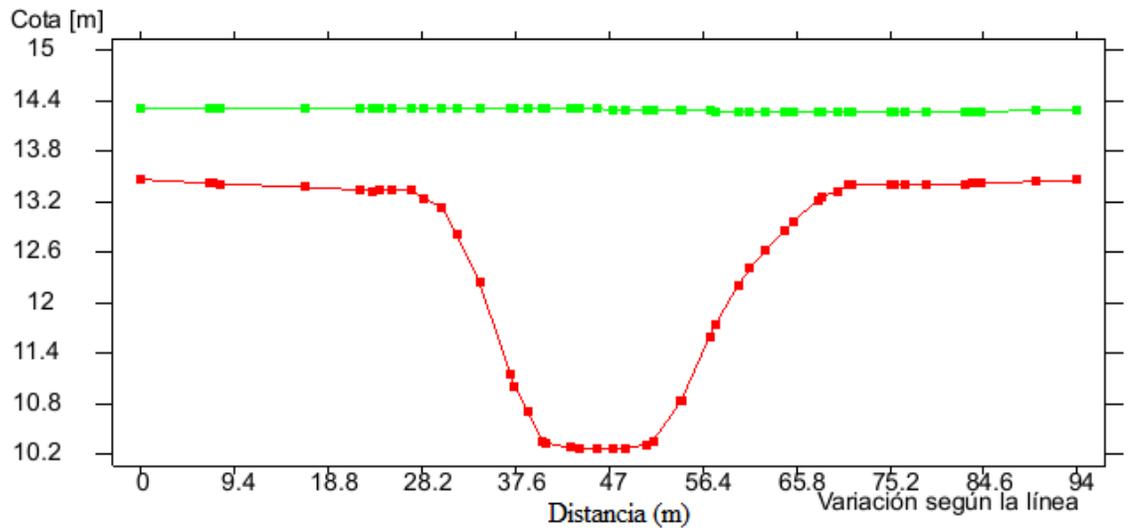


Figura 49. Sección transversal río Las Palmas número 5.

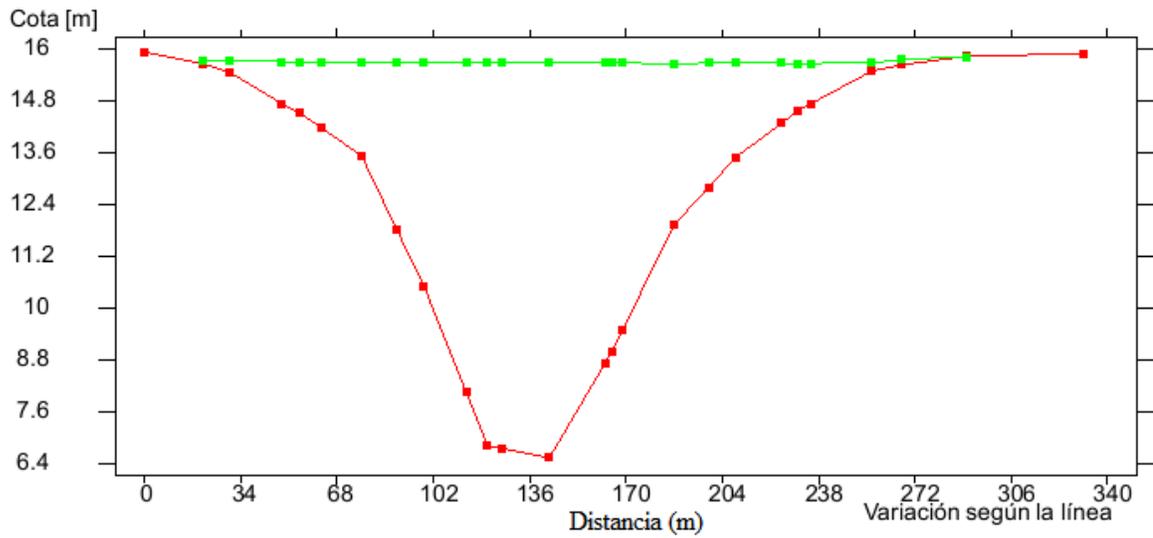


Figura 50. Sección transversal río Tempisque número 6.

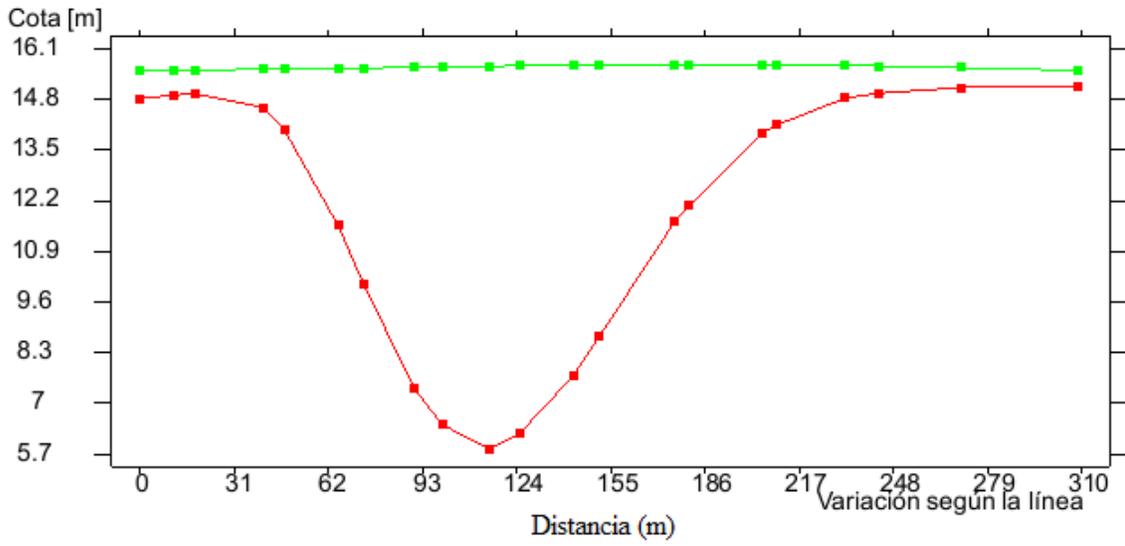


Figura 51. Sección transversal río Tempisque número 7.

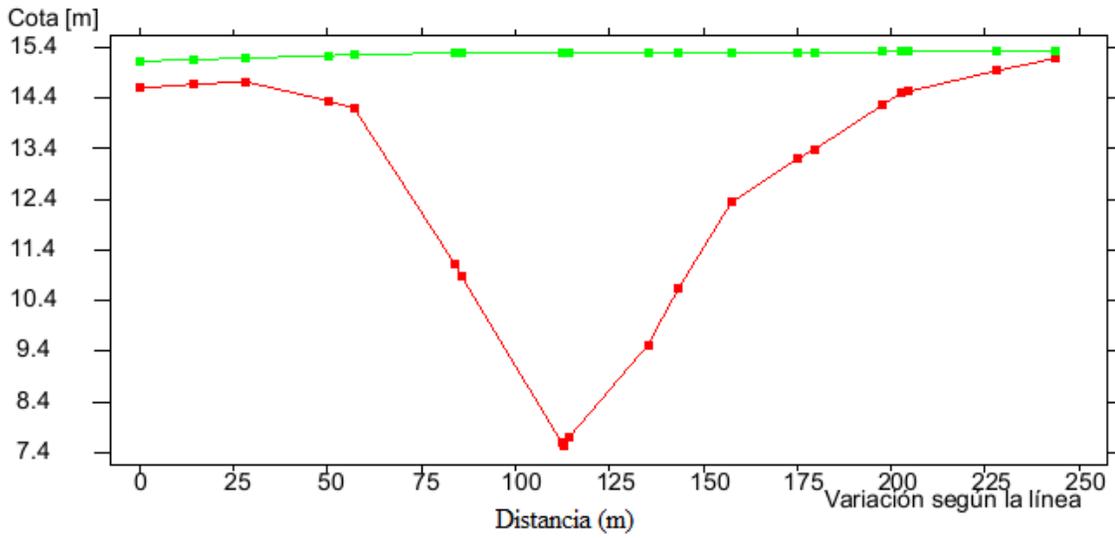


Figura 52. Sección transversal río Tempisque número 8.

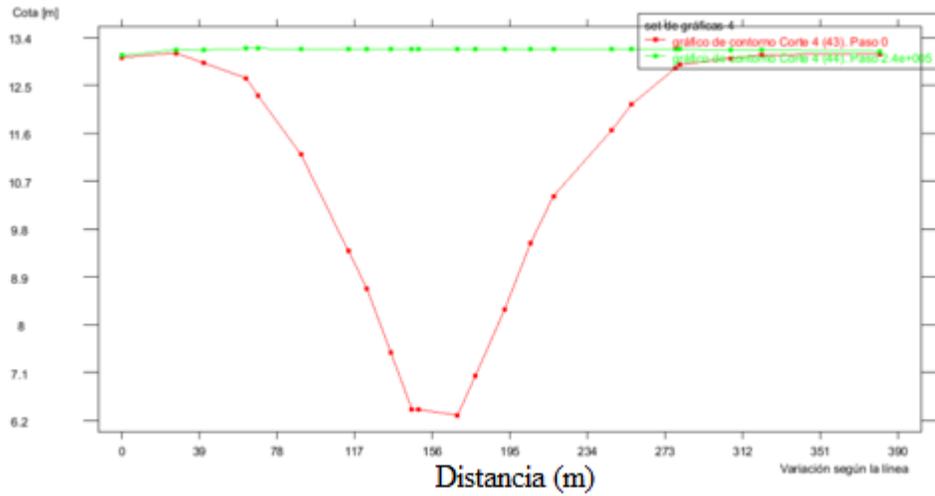


Figura 53. Sección transversal río Tempisque número 9.

11.2 Anexo 2. Hidrogramas usados en la modelación hidrodinámica.

Los datos de los hidrogramas vienen en el CD que junto a este documento en formato digital.