



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**Aplicación de la herramienta HECRAS 6.1 para el análisis del  
comportamiento hidráulico del río Piura sector La Encantada,  
Distrito de Chulucanas – Piura.**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**Ingeniero Civil**

**AUTOR:**

**Córdova Elera, Yoel Esleiter (ORCID: 0000-0003-1098-4851)**

**ASESOR:**

**Ordinola Enriquez, Luis Enrique (ORCID: 0000-0003-0439-4388)**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

**Diseño de Obras Hidráulicas y Saneamiento.**

**PIURA - PERÚ**

**2022**

### **Dedicatoria**

Esta tesis se la dedico a mis padres, hermanos y novia por su apoyo incondicional, asimismo a mi querida tía-mama Georgina Montalván Calle.

## **Agradecimientos**

Doy gracias a Dios por permitirme seguir cumpliendo mis objetivos, así como también guiarme en todas mis decisiones.

Un agradecimiento especial a mi asesor quien me brindo un gran apoyo en la culminación de mi tesis.

## ÍNDICE

Dedicatoria .....	i
Agradecimientos .....	ii
ÍNDICE DE TABLAS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	iv
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT .....	vii
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
<b>II. METODOLOGÍA: .....</b>	<b>18</b>
2.1 Tipo y diseño de la investigación .....	18
2.2 Variables y operacionalización.....	18
2.3 Población y muestra .....	19
2.3.1 Población.....	19
2.3.2 Muestra .....	19
2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	19
2.4.1 Técnicas.....	19
2.4.2 Instrumentos de recolección de datos.....	20
2.5 Procedimiento.....	20
2.6 Método de análisis de datos. ....	21
2.7 Aspectos éticos. ....	21
<b>III. RESULTADOS.....</b>	<b>22</b>
<b>IV. DISCUSIÓN.....</b>	<b>27</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>31</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>32</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>33</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>36</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Tabla de factores correctores para la aplicación del método de Cowan. ....	13
Tabla 2	Caudales determinados para diferentes periodos de recurrencia. ....	22
<b>Tabla 3</b>	<b>Caudales máximos instantáneos para distintos periodos de retorno. ....</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 4</b>	<b>Prueba de bondad de Ajuste. ....</b>	<b>52</b>
<b>Tabla 5</b>	<b>Coeficientes de rugosidad de Manning del río Piura- sector La Encantada .....</b>	<b>55</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Configuración de ríos .....	10
Figura 2	Ejemplo de tabla de propiedades y datos del terreno de la cara. ....	17
<b>Figura 3</b>	<b>Área de inundación real y simulada en el evento de marzo del 2017 (Niño Costero). ....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 4</b>	<b>Velocidades y tirantes hidráulicos para 1510 m<sup>3</sup>/s (Tr = 10) .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 5</b>	<b>Velocidades y tirantes hidráulicos para 2020 m<sup>3</sup>/s (Tr = 25) .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 6</b>	<b>Velocidades y tirantes hidráulicos para 2395 m<sup>3</sup>/s (Tr = 50) .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 7</b>	<b>Velocidades y tirantes hidráulicos para 2800 m<sup>3</sup>/s (Tr = 100) .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 8</b>	<b>Velocidades y tirantes hidráulicos para 3120 m<sup>3</sup>/s (Tr = 200) .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 9.</b>	<b>Serie de caudales máximos instantáneo estación puente Ñácara (1972 -2019). ....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 10.</b>	<b>Probabilidad de excedencia [%] puente Ñácara (1972 -2018) – Gamma 2P..</b>	<b>52</b>
<b>Figura 11.</b>	<b>Mapa de la variación espacial del coeficiente de rugosidad de Manning. ....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 12:</b>	<b>Mapa de tirantes hidráulicos y velocidades en el río Piura – Sector La Encantada (Tr = 10 años). ....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 13.</b>	<b>Mapa de tirantes hidráulicos y velocidades en el río Piura – Sector La Encantada (Tr = 25 años). ....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 14</b>	<b>Mapa de tirantes hidráulicos y velocidades en el río Piura – Sector La Encantada (Tr = 50 años). ....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 15:</b>	<b>Mapa de tirantes hidráulicos y velocidades en el río Piura – Sector La Encantada (Tr = 100 años). ....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 16.</b>	<b>Mapa de tirantes hidráulicos y velocidades en el río Piura – Sector La Encantada (Tr = 200 años). ....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 17.</b>	<b>Ubicación secciones transversales – Sector La Encantada. ....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 18</b>	<b>Secciones transversales río Piura km 1+700 y 3+250 – Sector La Encantada.</b>	<b>62</b>

**Figura 19** Secciones transversales río Piura km 4+250 y 6+250– Sector La Encantada. 62

**Figura 20.** Secciones transversales río Piura km 7+750– Sector La Encantada. .... 64

## RESUMEN

El río Piura se ubica en el norte del Perú, específicamente el departamento de Piura. Este es uno de los ríos más importantes del país. Sin embargo, debido a los diferentes eventos extremos como el fenómeno El Niño y a la falta de planificación de las autoridades de la cuenca alta, intermedia y baja, se han ocasionado catastróficas inundaciones que han provocado el deceso de personas, así como daños a la infraestructura básica, social, económica y productiva.

Este trabajo de investigación busca analizar el comportamiento hidráulico del río Piura en el sector La Encantada a partir del uso del software HECRAS v. 6.1 (River Analysis System) en su módulo bidimensional, con el propósito de evaluar los principales parámetros y variables hidráulicas, las cuales servirán de base para la planificación y diseño de futuras obras de protección ribereña proyectadas en este tramo del río Piura.

Es por ello que a partir de la modelación numérica se ha representado la avenida de marzo del 2017 (FEN Costero) la misma que ha sido calibrada con áreas de inundación observadas a partir de imágenes satelitales Sentinel 2, con el fin de generar un modelo potente que me represente a detalle el comportamiento hidráulico del río Piura en el sector La Encantada.

Lo que se pretende con este trabajo es aportar a la investigación del río Piura, a fin de que las entidades responsables de la gestión de los recursos hidráulicos de la cuenca tomen decisiones a fin de reducir los niveles de riesgo de inundaciones durante eventos extremos como el fenómeno El Niño.

**Palabras clave:** Inundaciones, comportamiento hidráulico, HECRAS, cuenca.

## ABSTRACT

The Piura River is located in the north of Peru, specifically in the department of Piura. It is one of the most important rivers in the country. However, due to different extreme events such as the El Niño phenomenon and the lack of planning by the authorities of the upper, intermediate and lower basin, catastrophic floods have caused the death of people, as well as damage to basic, social, economic and productive infrastructure.

This research work seeks to analyse the hydraulic behaviour of the Piura river in the La Encantada sector, using HECRAS v. 6.1 (River Analysis System) software in its two-dimensional module, in order to evaluate the main hydraulic parameters and variables, which will serve as a basis for the planning and design of future river protection works projected in this section of the Piura river.

For this reason, based on numerical modelling, the flood of March 2017 (Coastal FEN) has been represented, which has been calibrated with flood areas observed from Sentinel 2 satellite images, in order to generate a powerful model that represents in detail the hydraulic behaviour of the Piura River in the La Encantada sector.

The aim of this work is to contribute to research on the Piura river, so that the entities responsible for the management of the basin's hydraulic resources can make decisions in order to reduce flood risk levels during extreme events such as the El Niño phenomenon.

**Keywords:** Floods, hydraulic behaviour, HECRAS, basin.

## I. INTRODUCCIÓN

La costa norte del Perú es afectada frecuentemente por lluvias y avenidas extraordinarias durante el Fenómeno El Niño - Oscilación del Sur (FEN). Este acontecimiento climático causa daños en la infraestructura básica y población, como consecuencia de fuertes inundaciones durante la recurrencia de avenidas extraordinarias en el río Piura. A partir de un análisis histórico-temporal de los eventos extremos más desastrosos en costa norte del Perú, los más recientes son los acontecidos en los meses de febrero a marzo de 1973, marzo a junio de 1983, febrero a abril 1998 y marzo del 2017, los cuales han generado el deceso de vidas humanas y cuantiosos agravios a los servicios básicos como a la economía de la población del departamento de Piura.

La cuenca del río Piura se ubica políticamente en el departamento de Piura, específicamente en la zona norte del Perú. Según ANA (2008) la cuenca tiene un área total de 10 872,1 km<sup>2</sup>, ubicada entre las coordenadas geográficas 81°00' a 79°29' longitud oeste y 5°45' a 4°46' latitud sur. Para este estudio se ha realizado un análisis de 9.0 kilómetros del río Piura, ubicados en el sector La Encantada, tramo que se encuentra ubicado aguas abajo del puente Ñácara, distrito de Chulucanas.

Durante las avenidas producidas por el FEN Costero en el mes de marzo del 2017, los caudales máximos instantáneos que se generaron fueron suficientes para inundar la margen izquierda del sector la Encantada, perdiéndose varias hectáreas de cultivos de exportación, además de modificar la morfología del cauce, produciéndose la avulsión del río Piura en la localidad de La Encantada. Las condiciones que se generaron durante la avenida perjudicaron las instalaciones del Complejo Agroindustrial Beta, además de la afectación a la infraestructura de defensa ribereña existente y a la población de esta localidad.

En la actualidad la infraestructura productiva de las instalaciones del complejo Agroindustrial Beta y las poblaciones adyacentes al cauce del río Piura en el Sector La Encantada, sufren frecuentemente inundaciones y la pérdida de áreas de cultivo por erosión en ambas márgenes durante los eventos de máximas avenidas. Por lo antes mencionado es que se necesita un estudio del

comportamiento hidráulico del río en esta zona con el fin de minimizar los niveles de riesgo ante inundaciones.

Por otro lado, la localidad de La Encantada y el complejo agroindustrial Beta poseen un conjunto de obras de protección ribereña compuesta por una batería de espigones de enrocado, enrocados de pie de talud y diques longitudinales en la margen izquierda del río. Sin embargo, gran parte de este conjunto de obras de protección no han funcionado correctamente, ya que durante la última avenida de marzo del 2017 algunas fallaron por sobrevertido como es el caso del dique Beta (cota de la superficie libre del agua supero el nivel de la rasante del dique), al igual que el enrocado de pie de talud en la localidad La Encantada, que falló por erosión de la margen y socavación de la cimentación del enrocado.

Teniendo en cuenta la problemática existente en la zona de estudio, se plantea el siguiente problema de carácter general: ¿En qué medida la aplicación de la herramienta Hecras 6.1 permite analizar el comportamiento hidráulico del río Piura Sector La Encantada, distrito de Chulucanas – Piura?

Por otro lado, la siguiente investigación se justifica planteando un modelo hidráulico que represente a detalle el comportamiento hidrodinámico del río Piura, a fin de minimizar el riesgo ante desbordes en la Localidad de La Encantada. Por otra parte, se justifica académicamente ya que con este trabajo se permitirá ampliar el conocimiento teórico en la hidráulica fluvial la cual servirá para el planteamiento hidráulico de futuras obras de protección contra inundaciones en la zona de estudio, así como un antecedente de investigación para trabajos y estudios posteriores en el río Piura.

Es por ello que la presente investigación se ha trazado los siguiente objetivos, siendo el objetivo principal analizar el comportamiento hidráulico del río Piura en el Sector La Encantada, distrito de Chulucanas-Piura, así mismo se presenta tres objetivos específicos, el primer objetivo específico es de determinar los máximos caudales para diferentes periodos de recurrencia en el río Piura Sector La Encantada, el segundo objetivo específico es construir y calibrar un modelo

hidráulico bidimensional en el software Hecras 6.1 para el río Piura Sector La Encantada y finalmente el tercer objetivo específico es determinar las variables y parámetros hidráulico del río Piura sector La Encantada.

Los resultados obtenidos de este estudio servirán de base y de herramienta para la administración y manejo de los recursos hidráulicos de la cuenca del medio y Alto Piura, así como un herramienta para la elección de medidas frente a la reducción del riesgo ante desbordes del río durante acontecimientos extremos como El Niño - Oscilación del Sur.

## II. MARCO TEÓRICO

Con relación a los antecedentes internacionales Ojeda (2018) realizó su trabajo de investigación denominado “Modelación numérica del comportamiento hidrodinámico del río Arauca, en el sector de Boca de gaviotas” - Arauquita, Colombia. La investigación tuvo por objetivo principal crear un modelo conceptual del comportamiento hidráulico del río Arauca a partir de la simulación hidráulica a fin de predecir las características hidráulicas más sustanciales del río en estudio. De los resultados de este trabajo se destaca el análisis de la hidrodinámica del sistema fluvial, así como al análisis del transporte de sedimentos. Una de las conclusiones principales de este estudio fue señalar que la modelación hidráulica aplicando modelos numéricos muestra una gran capacidad y flexibilidad ya que representan adecuadamente la distribución de caudales, velocidades, fuerzas tractivas y tirantes hidráulicos a lo largo del río Arauca.

Por otro lado, Ochoa (2016) desarrollo el artículo: “Modelación hidrodinámica del tramo medio el rio Ctalamochita, Provincia de Córdoba – Argentina”. El trabajo desarrolla la necesidad de realizar un modelo numérico para la identificación de zonas inundables durante eventos de crecida. En este artículo se desarrolló un modelo hidráulico con el software Hecras y la herramienta Iber a partir de los cuales determinó el comportamiento hidráulico del río Ctalamochita. Los resultados de este trabajo muestran la precisión numérica de cada software de modelado hidráulico para la identificación de áreas de inundación, así como la comparación de las principales variables hidráulicas obtenidas de las simulaciones. El autor concluye la eficiencia y ventaja del modelado a través de esquemas bidimensionales en la representación de las principales variables hidráulicas de flujos en lámina libre.

Asimismo, Rincón & Perozo (2014) en su trabajo de investigación denominado: “Comportamiento hidráulico de la quebrada Atarigua en el cruce con el puente ubicado sobre la troncal 7, Municipio Jimenez, Edo. Lara”. Los autores presentan un análisis hidrológico a fin de determinar el caudal máximo que circula a través de la quebrada Atarigua, además del modelamiento hidráulico empelando el software HECRAS. De los resultados obtenidos en su estudio concluyen que el sistema fluvial desarrolla un régimen de flujo muy próximo al crítico, a causa de la variación de la geometría del cauce, además que para un flujo permanente se

producen los máximos tirantes hidráulicos, mientras que para el régimen de flujo transitorio se desarrolla un incremento en las velocidades. De los cálculos obtenidos de la simulación hidráulica los autores concluyen que la quebrada tiene el área hidráulica necesaria para transportar un caudal máximo para un periodo de recurrencia de 100 años sin riesgo de desborde.

Con relación a los antecedentes nacionales Rodríguez (2018) en su tesis denominada “Modelamiento hidrodinámico del tramo urbano del río Huarmey con fines de ubicación y diseño de una estructura de contención, región Áncash”. El autor analiza el comportamiento hidráulico de un tramo del río con el objetivo principal de emplazar y proyectar una obra de protección a fin de reducir el riesgo ante inundaciones y erosión de las márgenes del cauce. El autor realizó un modelado hidráulico unidimensional aplicando el software HECRAS, obteniendo como resultados niveles de lámina de agua y velocidades máximas así como información necesaria para el cálculo de la erosión general a lo largo del sistema fluvial. De las conclusiones de éste estudio se menciona que el estudio hidrológico e hidráulico son fundamentales para la planificación proyectos hidráulicos, además que la morfología y condiciones del cauce son factores de mucha influencia en el modelamiento hidráulico.

Por otro lado, Aguilar, Marcelo, Fasanando y Anselmo (2014) en su estudio “Diseño hidráulico y estructural de defensa ribereña del río Chicama tramo puente Punta Moreno – Pampas de Jagüey, aplicando el programa River”. La investigación desarrollo como objetivo principal analizar el comportamiento del flujo del río Chicama, así como proyectar un sistema para el control de inundaciones a fin de minimizar la pérdida de áreas de cultivos agrícolas en ambas márgenes del río.

Los resultados de este trabajo brindan una alternativa para la planificación de una obra ribereña del río Chicama en el tramo del sector pampas de jagüey en función de los cálculos obtenidos en los estudios de ingeniería básica y la aplicación de metodologías existentes para la reducción del riesgo.

De las conclusiones más importantes señaladas por los autores se resalta la alta precisión de los modelos numéricos para el análisis hidráulico de sistemas fluviales, así como la importancia de estas herramientas para el diseño de obras hidráulicas.

Asimismo, Ipanaqué (2005) en su estudio de modelación numérica del río Piura, aplicando river-2d entre los puentes Cáceres e integración - Piura. El objetivo principal de la tesis fue incrementar el conocimiento de los beneficios de la aplicación de los modelos numéricos en la aplicación en la hidráulica fluvial empleando modelamiento hidráulico bidimensional. Los resultados obtenidos en esta investigación son bastante parecidos a los desarrollados durante la crecida del río durante El Niño de 1998. El autor muestra una comparación entre las velocidades del flujo y los calados hidráulicos observados en los diferentes puentes que unen a la ciudad de Piura y Castilla y los obtenidos en la simulación hidráulica, presentando una diferencia mínima. De las conclusiones más importantes mencionadas por el autor se destaca que la aplicación de modelos hidráulicos son una herramienta muy precisa y de gran aplicación en la hidráulica fluvial, permitiendo de forma económica y profesional su aplicación frente a los modelos a escala.

Con relación a los antecedentes locales Orellana (2021) en su trabajo de investigación de modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura utilizando Hechms y hecras. El objetivo principal del proyecto es desarrollar un modelo hidráulico e hidrológico en la cuenca hidrográfica del río Piura, a fin de identificar las zonas de inundación en el tramo urbano y proponer medidas para reducir los daños. De los resultados logrados en la proyecto se destaca su criterio obtenido para la conceptualización del modelo hidrológico y modelo hidráulico, así como las áreas de inundación representadas en la zona urbana entre la ciudad de Piura y Castilla. El autor concluye que la avenida máxima para un periodo de recurrencia de 100 años en la ciudad de Piura es de  $5477 \text{ m}^3/\text{s}$ , y que el cauce del río no posee la capacidad hidráulica para transportar caudales mayores a un periodo de recurrencia de 50 años, además que para resolver el problema de las inundaciones es necesario proyectar presas de retención de masas de agua y sedimento en la parte alta y media de la cuenca.

Córdova (2020) en su trabajo denominado "Análisis del comportamiento hidráulico - sedimentológico del río Piura, tramo presa Los Ejidos- Sector Cordillera, Perú. Problemática actual y propuestas de solución". El autor tuvo como objetivo principal estudiar y representar el comportamiento hidrodinámico del río Piura en

su cuenca Baja, aplicando como herramienta de modelación el software HECRAS en su módulo unidimensional y bidimensional. De los resultados logrados en la investigación el autor determinó la capacidad de transporte del encauzamiento del Bajo Piura, así como también analizó la problemática del tramo canalizado debido al acelerado fenómeno de sedimentación-agradación en el cauce y llanuras de inundación del río Piura. De las principales conclusiones el autor considera la eficiencia e importancia de la aplicación de la modelación hidráulica en grandes sistemas fluviales, así como también señala que el sistema de protección de la cuenca Baja del río Piura no tiene la capacidad hidráulica para transportar el flujo correspondiente a un caudal con un periodo de recurrencia de 100 años. Además el autor recomienda renaturalizar la desembocadura al Océano Pacífico del río Piura por su cauce antiguo por la bahía de Sechura a fin de evitar inundaciones, sedimentación y aterramiento del complejo Lagunar Ramón- Ñapique y La Niña.

Por otro lado, Reyes, Maza & Martín (2019) en su trabajo de investigación denominado “Análisis del comportamiento hidráulico del río Piura, en presencia de fenómeno El Niño”, analizan los efectos generados por el FEN Costero generado en el mes de marzo del año 2017 y construyen un modelo numérico que represente el mismo con el objetivo de determinar la capacidad de transporte de flujo del río Piura. De las conclusiones más importantes se puede mencionar que se han presentado fenómenos de erosión general a lo largo del cauce principal así como el transporte de gran cantidad de sedimento en suspensión. Además los autores recomiendan realizar un mantenimiento y rehabilitación de las estructuras existentes a lo largo del cauce del río.

### **Teorías relacionadas al tema.**

Con referencia a la evaluación de diferentes modelos hidrodinámicos para representar el flujo en cauces naturales Ochoa (2014), menciona que los fenómenos de flujo en lámina libre que ocurren en sistemas fluviales son muy complejos, y que en muchas ocasiones no se resuelven mediante métodos analíticos exactos, es por ello que se busca aplicar otras metodologías como es el caso de los métodos numéricos, estos últimos permiten calcular las principales características hidráulicas que establecen el flujo en sistemas fluviales. En la actualidad se ha logrado un gran desarrollo de modelos matemáticos y ordenadores

que permiten la determinación de las principales características hidrodinámicas sin importar el entorno ni las condiciones existentes en el cauce, facilitando así la representación a detalle del comportamiento del flujo para el diseño de obras hidráulicas.

Según Ochoa (2014) en el estudio de la hidráulica de ríos, actúan gran cantidad de parámetros y fenómenos que deben estar presentes en el comportamiento hidráulico del flujo, como, por ejemplo:

- a) Las asociadas a los tirante hidráulico, perímetro mojado, área hidráulica, velocidades del flujo, fuerzas tractivas, pendiente del terreno, etc.
- b) El material que forma parte del perímetro mojado del cauce fluvial, así como de las márgenes como los diámetros característicos y cobertura vegetal.
- c) El transporte de sólidos de fondo y de suspensión.

La necesidad de entender y comprender los diferentes fenómenos en la naturaleza ha conllevado a mejorar los modelos hidráulicos unidimensionales, esto gracias al avance en los ordenadores lo cual ha permitido desarrollar esquemas hidrodinámicos bidimensionales y tridimensionales (Ochoa, 2014).

Con referencia a defensas ribereñas Álvaro y Henríquez (2014) las definen como estructuras transversales al flujo, desarrolladas para reducir la pérdida de áreas de terreno colindantes a los ríos contra los procesos de erosión lateral de márgenes, así como también evitar desbordes de caudales durante crecidas que pueden generar daños a la población. Estas estructuras se ubican en zonas estratégicas, que eviten poner en riesgo a poblaciones.

Además, Álvaro y Henríquez (2014) manifiestan que los estudios básicos de ingeniería, así como evidencias tomadas en campo, permiten identificar el problema que se desarrolla en la zona. La recolección de los diferentes antecedentes e información existente permite realizar un diagnóstico preciso a fin de planificar y proyectar obras fluviales que permitan minimizar los daños generados durante la crecida de los ríos.

Con referencia a estructuras de protección ribereña Rocha (1998) define a los espigones como estructuras que se anclan en las márgenes fluviales. Estas estructuras deflecan el flujo, lo que las expone a las fuerzas desarrolladas por la corriente. Para su construcción se pueden emplear gran cantidad de materiales, los cuales van a estar en función del entorno y objetivo a cumplir, a continuación, se mencionan algunos de los casos más aplicados:

- a) Proteger las márgenes de la erosión por las excesivas velocidades.
- b) Alejar el flujo de las márgenes.
- c) Estabilizar y recuperar las márgenes.
- d) Desarrollar un ancho estable del cauce principal.
- e) Evitar el excesivo desplazamiento lateral de meandros.
- f) Rectificar y alinear cauces.

### **Dinámica fluvial**

Según Rocha (1998) un río aluvial está cambiando continuamente tanto en planta como en elevación, esto se genera por las tensiones y fuerzas tractivas que actúan sobre el fondo y las paredes laterales del cauce y llanuras de inundación. Los cambios geomorfológicos en ocasiones son lentos tanto como rápidos, así también pueden ser de origen natural o antropogénico. Cuando los agentes externos actúan sobre el sistema fluvial, se generan secuelas que tienen efectos negativos en tramos ubicados hacia aguas arriba y/o hacia aguas abajo. Estos problemas en ocasiones pueden llegar a ser incontrolables y difíciles de corregir. Por ejemplo, la construcción de una presa en un cauce natural puede provocar una alteración en la morfología en sección y perfil longitudinal, así como también en el régimen de caudales del sistema fluvial, es decir puede provocar una serie de cambios en la estabilidad del río, tales como la erosión (degradación) hacia aguas abajo y sedimentación (agradación) hacia aguas arriba.

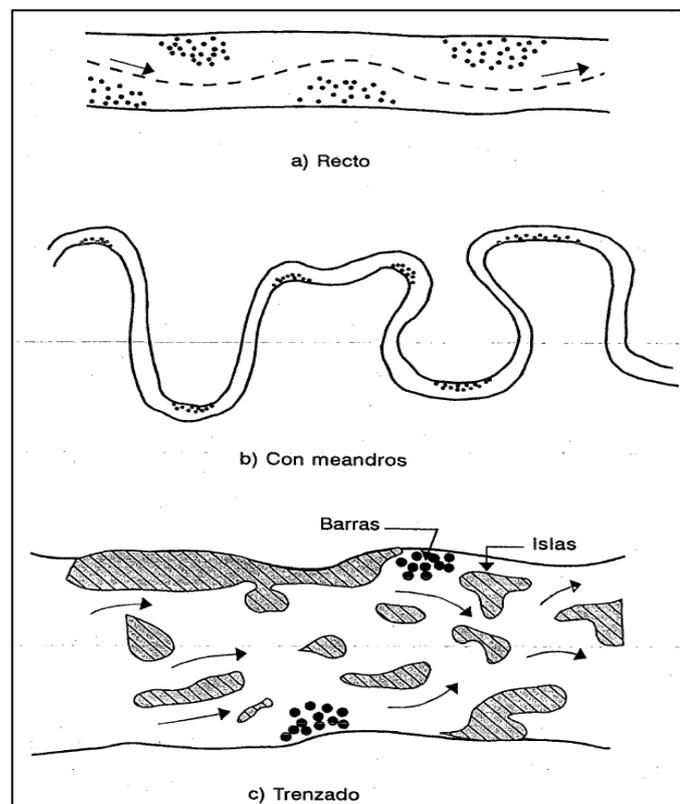
### **Morfología fluvial**

Según Martín (2001) es muy raro encontrar en la naturaleza cauces con una configuración recta y regular. Sin embargo, es muy común encontrar dos morfologías fluviales típicas. Una de ellas es una configuración de un cauce trezado, una de las características de este tipo de cauce es que

geomorfológicamente es muy ancho e inestable. Este tipo de cauce está formado por una gran diversidad de cauces pequeños entrelazados o trenzados, debido a esta configuración se forman barras o islas entre sí que dependiendo del régimen de caudales se separan y vuelven a unirse entre sí. La segunda tipología de morfología fluvial más común es la de un cauce sinuoso, este tipo de cauce presenta un solo cauce principal el cual desarrolla una secuencia de curvas con amplios radios de curvatura, así como grandes amplitudes denominados meandros. El desarrollo de los meandros consiste en una profundización de las orillas externas de las curvas, así como una progresión o desplazamiento en direcciones aguas abajo.

En el análisis de la morfología de un río se deben tener en cuenta varias perspectivas las cuales están definidas principalmente por la geometría del su cauce y sus llanuras de inundación, es importante conocer también la configuración en planta y en alzado del thalweg del río, así como también su régimen de transporte de sedimentos, diámetros característicos, cobertura vegetal, etc. (González & García, 2001).

**Figura 1** Configuración de ríos



**Fuente:** (García & Maza, 1996)

## Erosión de cauces

Según Martín (2001) la erosión es la eliminación de partículas del material constituyente de un lecho del cauce, por las tensiones y fuerzas ejercidas la velocidad que desarrolla la corriente del flujo cuyo resultado es el descenso del nivel del fondo del cauce. La erosión se puede clasificar como un fenómeno local o incluso un fenómeno general. Desde el punto de vista hidráulico la erosión general se puede relacionar directamente con la velocidad media de la corriente, este tipo de erosión afecta a tramos largos del cauce y sería la única en un cauce de configuración recta, geometría prismática sin ninguna singularidad. Sin embargo, la erosión local es mas puntual y afecta directamente en una zona donde se desarrolla una distorsión del flujo, es decir donde se desarrollan flujos varicoso con velocidades máximas.

## Rugosidad de Manning

El coeficiente de rugosidad de Manning está definido como el parámetro que me indica la resistencia que provocan los taludes y fondo del canal al avance de la corriente, este valor esta influenciado por diferentes factores como el tipo de material que conforma el lecho, forma y variación de la sección transversal y cobertura vegetal (Rocha, 1998).

La formulación del coeficiente de rugosidad de Manning es el desarrollo de la ecuación desarrollada por Chézy para el cálculo de la velocidad media del flujo en tuberías y en canales abiertos.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

Donde;

V = velocidad media del flujo, en m/s.

n = rugosidad del perímetro mojado.

R = radio hidráulico de la sección(m)

S = pendiente de la línea de energía (m/m).

Una metodología muy aplicada para determinar el coeficiente de rugosidad de Manning para cauces naturales es el método de Cowan (1956), cuya formulación se detalla a continuación:

$$n = m_5 (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)$$

Donde;

$n_0$ : Coeficiente de rugosidad en función del material de la superficie del cauce.

$n_1$ : Factor que representa el efecto de las irregularidades superficiales tanto en cauce principal como en planicie de inundación.

$n_2$ : Factor que representa las variaciones de forma y tamaño de la sección transversal.

$n_3$ : Factor que representa el efecto de obstrucciones en el cauce principal y en planicie de inundación.

$n_4$ : Factor que representa la de presencia de vegetación existente tanto en cauce principal como en planicie de inundación.

$m_5$ : Factor que representa la sinuosidad del thalweg (frecuencia de meandros y curvas).

En la tabla 1 se muestra los valores más representativos según las condiciones del cauce para la aplicación de la metodología de Cowan (1956).

**Tabla 1** Tabla de factores correctores para la aplicación del método de Cowan.

Superficie del Canal	Tierra	$n_0$	0,020
	Roca		0,025
	Grava fina		0,024
	Grava gruesa		0,028
Irregularidad	Suave	$n_1$	0,000
	Menor		0,005
	Moderada		0,010
	Severa		0,020
Variación de la Sección	Gradual	$n_2$	0,000
	Ocasional		0,005
	Frecuente		0,010 – 0,015
Efecto de la Obstrucción	Despreciable	$n_3$	0,000
	Menor		0,010 – 0,015
	Apreciable		0,020 – 0,030
	Severo		0,040 – 0,060
Vegetación	Bajo	$n_4$	0,005 – 0,010
	Medio		0,010 – 0,025
	Alto		0,025 – 0,050
	Muy alto		0,050 – 0,1
Intensidad de Meandros	Menor	$m_5$	1,000
	Apreciable		1,150
	Severo		1,300

Fuente: (Rocha, 1998)

### **Modelos matemáticos para el estudio de sistemas fluviales.**

En la actualidad la aplicación de modelos matemáticos facilita el cálculo de los valores de las diferentes variables hidráulicas, así como la hidrodinámica de un sistema fluvial. Los modelos realizan una serie de iteraciones para resolver las diferentes ecuaciones de calculo que gobiernan la hidrodinámica del flujo en lámina libre, empleando para su resolución diferentes metodologías como la de elementos finitos, diferencias y volúmenes finitos (Basile, 2000).

### **Modelos hidráulico en dos dimensiones (2D).**

Para la resolución de las ecuaciones de flujo en los modelos numéricos, se genera una discretización espacial del dominio del modelo mediante una rejilla ortogonal

denomina malla computacional, la cual está conformada por un conjunto de celdas estructuradas y no estructuradas, que se adaptan al relieve del terreno tanto del cauce principal como de las planicies de inundación. En la actualidad se han desarrollado una variedad de herramientas informáticas con licencia y distribución gratuita. Estos software permiten la resolución de las ecuaciones flujo de agua en lámina libre en dos dimensiones ( $x$ ;  $y$ ), los cuales han desarrollado mecanismos matemáticos más potentes como las diferencias finitas, elementos y volúmenes finitos (Bladé et al, 2014).

El sistema de ecuaciones reconocidas de Navier-Stokes, nos aproxima a idealizar el movimiento de los fluidos en un espacio de tres dimensiones. Debido a la cantidad de fenómenos que se desarrollan en un sistema hidráulico, es muy complicado representarlos en su totalidad. Sin embargo, para ello se aplican simplificaciones en el cálculo a fin de poder aproximarse lo mejor posible a dicho fenómeno físico. Por ejemplo, un sistema simplificado de ecuaciones para el cálculo del flujo son las formulaciones de aguas someras o poco profundas (SW), en donde se hace una serie de suposiciones como considerar un flujo completamente incompresible con una densidad uniforme y presión hidrostática. También se asume la diferencias de escalas tanto horizontal como vertical. Como resultado de esto, la velocidad en el eje vertical es mínima y la presión que se desarrolla es hidrostática, lo que lleva a la forma diferencial de las ecuaciones de aguas poco profundas (USACE, 2021).

En situaciones de aguas someras, el término de gradiente de presión y los factores de fricción del fondo son los fuentes que gobiernan en las formulaciones de cantidad de movimiento por lo que los términos de flujo inestable, advección y viscoso pueden despreciarse. La ecuación de la cantidad de movimiento se transforma en la forma 2D de la aproximación de la onda difusiva. La unión de esta formulación matemática con las ecuaciones de la conservación de masa genera una representación matemática de una compleja ecuación, conocida en el campo de la hidráulica como la aproximación de la onda difusa de las ecuaciones de aguas poco profundas (USACE, 2021).

## Conceptos y bases de cálculo de modelos bidimensionales – Caso HECRAS.

El software Hecras en su nueva versión 6.1 ha mejorado sus mecanismos de cálculo, incorporando una serie de ecuaciones matemáticas que resuelven las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, a estas ecuaciones se les conoce en el campo de la hidráulica como las ecuaciones de onda difusiva y ecuaciones completa de St. Vennat. Ambos sistemas de ecuaciones desarrollan el concepto de una distribución de la presión hidrostática del flujo y una distribución casi uniforme de la velocidad del flujo en la profundidad (USACE, 2021).

### Conservación de la masa

Suponiendo que el flujo es incompresible, la forma diferencial inestable de la ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (H u)}{\partial X} + \frac{\partial (h v)}{\partial y} = q$$

donde  $t$  representa el tiempo y  $v$  define la velocidad en la dirección (x; y), y  $q$  es el termino de fuente / sumidero. Siguiendo las convenciones de signos estándar de HEC-RAS, los sumideros son negativos y las fuentes son positivas.

### Conservación del momento

La velocidad vertical que se desarrolla en el flujo es mínima debido a la diferencia entre las escalas de longitud horizontal respecto de la vertical. La ecuación de la cantidad de movimiento vertical de Navier-Stokes se puede emplear para justificar que la presión es netamente hidrostática. Los términos de velocidad y derivada verticales se pueden despreciar con seguridad.

A continuación, se muestran las formulaciones matemáticas de aguas someras o poco profundas (SW):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_c v = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_{t,xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_{t,yy} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,x}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f_c u = -g \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_{t,xx} h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_{t,yy} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,y}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho h}$$

**u** y **v** = velocidades en las direcciones (x; y)

**g** = aceleración gravitacional

**z<sub>s</sub>** = elevación de la superficie del agua

**ν<sub>t,xx</sub>** y **ν<sub>t,yy</sub>** = horizontales coeficientes de viscosidad de Foucault en las x y y direcciones

**T<sub>bx</sub>** y **T<sub>by</sub>** = Tensiones de cizallamiento inferiores om las x y y direcciones

**R** = radio hidráulico

**τ<sub>s,x</sub>** y **τ<sub>s,y</sub>** son las tensiones del viento en la superficie en las direcciones (x; y), respectivamente

**h** es la profundidad del agua

**f<sub>c</sub>** es el parámetro de Coriolis.

### Modelado de turbulencias

La turbulencia que se desarrolla en un sistema hidráulico es un fenómeno demasiado complejo de movimiento de fluidos completamente desordenados (turbulento) y vórtices que engloban un amplio campo de escalas de longitud.

Debido a la complejidad para resolver este fenómeno físico muchas veces no es posible emplear un modelo numérico discreto, esto a causa de la gran variedad de escalas de longitud que muchas veces son muy pequeñas. Para ello se representa matemáticamente la mezcla de flujo turbulento mediante un proceso de difusión en gradiente.

La viscosidad parásita se calcula de la siguiente manera:

$$\nu = D u_* h + (C_s \Delta)^2 |\bar{S}|$$

donde el tensor  $\mathbf{D}$  es el tensor del coeficiente de mezcla,  $\mathbf{u}^*$  es la velocidad de corte,  $\mathbf{h}$  es la profundidad del agua,  $\mathbf{C}_s$  es el coeficiente de Smagorinsk y (aproximadamente entre 0.05 y 0.2),  $\Delta$  es el ancho del filtro igual a la resolución de la cuadrícula local, y  $|\mathbf{S}|$  es la tasa de deformación.

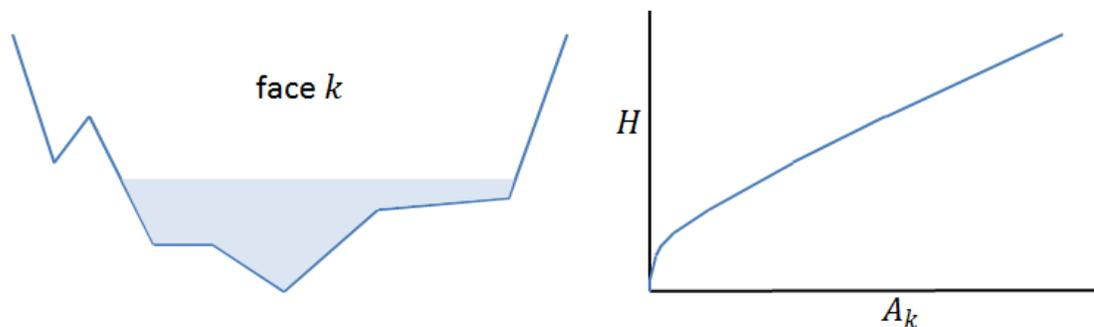
### Métodos numéricos

HEC-RAS resuelve la ecuación de onda de difusión (DWE) y las ecuaciones de aguas poco profundas (SWE). La herramienta permite aplicar dos métodos para resolver el SWE en HEC-RAS estos métodos son: el Método Euleriano-Lagrangiano (ELM-SWE) y el Método Euleriano (EM-SWE). (USACE, 2021).

Los solucionadores son similares excepto en cómo tratan los términos del gradiente de presión y aceleración. En general, los tres solucionadores utilizan una combinación de métodos de diferencia finita y volumen finito en una malla poligonal no estructurada con batimetría de subcuadrícula. (USACE, 2021).

### Batimetría de subcuadrícula

El continuo avance tecnológico en la teledetección aerotransportada puede proporcionar datos topográficos de muy alta resolución. En muchos casos, los datos son demasiado densos para ser utilizados directamente como una cuadrícula para el modelo numérico. Esta situación presenta un dilema en el que se debe utilizar una cuadrícula computacional relativamente burda para producir una simulación de fluidos, pero las características topográficas finas deben incorporarse en el cálculo. (USACE, 2021).



**Figura 2** Ejemplo de tabla de propiedades y datos del terreno de la cara.  
**Fuente:** (USACE, 2021)

## **II. METODOLOGÍA:**

### **2.1 Tipo y diseño de la investigación**

#### **Tipo de investigación**

“En la ciencia se desarrolla una gran variedad de tipologías de investigación y es muy importante conocer todas sus características y ventajas para conocer cuál de todas es la que mejor se acopla a la investigación que se realizara” (Borja, 2012).

El tipo de de investigacion del proyecto es Aplicativa ya que se hace uso de los diversos conocimientos tanto teóricos como prácticos, con el objetivo de analizar el comportamiento hidráulico de un sistema fluvial a fin de reducir los niveles de vulnerabilidad y riesgo ante inundaciones.

#### **Diseño de la investigación**

Este trabajo representa una investigación con un diseño no experimental – descriptiva, esto se debe a que la información y los datos tomados de campo permitirán verificar las condiciones actuales del río Piura en el sector La Encantada, con el propósito de describir las principales características hidrodinámicas del sistema fluvial.

### **2.2 Variables y operacionalización**

Según Arias (2012) una variable está definida como un atributo o característica que puede tener algunas variaciones, y que es un objetivo de estudio, modificación o control en un proyecto de investigación.

#### **Definición conceptual**

El comportamiento hidráulico representa el funcionamiento del flujo en lamina libre a lo largo de un sistema fluvial, además de estudiar las principales variables hidráulicas a lo largo del cauce como; velocidad media del flujo, tirantes hidráulicos, fuerzas tractivas, etc. además de representar las áreas inundables teniendo como información de base el caudal máximo, topografía, rugosidad de Manning. (Córdova, 2020)

## **Definición operacional**

Se realiza el análisis del comportamiento hidráulico en el río Piura Sector La Encantada para analizar las principales variables hidráulicas que se generan en el cauce, además de visualizar las áreas inundables a lo largo del tramo de estudio.

### **2.3 Población y muestra**

#### **2.3.1 Población**

Según Arias (2012) la población está determinada en un conjunto que puede ser finito o infinito de elementos que poseen atributos que pueden ser similares, además de que está delimitada por el problema y los objetivos de la investigación.

El estudio tiene como localización el cauce del río Piura. Por lo que se puede deducir que la población está compuesta por los más de 320 kilómetros de recorrido longitudinal de este sistema fluvial.

#### **2.3.2 Muestra**

Según Arias (2012) la muestra es un subconjunto muy representativo y definido que se extrae de la población. La muestra para el presente proyecto es el tramo del río Piura ubicado entre el puente Ñácara y el complejo Agroindustrial Beta, que pertenece políticamente al distrito de Chulucanas, y a la provincia de Morropón - Piura, con una longitud aproximada de 9.5 kilómetros del río Piura.

### **2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

#### **2.4.1 Técnicas**

Según Tamayo (1999), señala a los pasos que se deben seguir durante la investigación como “un término operativo del diseño de investigación la cual establece concretamente como se realizó la investigación.”

Por lo antes señalado para este trabajo estudio las técnicas empleadas pertenecen a los procedimientos que ayuden a obtener datos que brinden respuesta a las preguntas planteadas de la investigación.

Una de las fuentes empleadas en este trabajo es la observación – estructurada, la cual permitirá observar el problema existente en la zona del

proyecto de investigación, además de estudios de campo e información obtenida de revistas científicas, libros, tesis, etc. Ambas fuentes de información están conexas con el objetivo de investigación y gracias a las mismas se entenderá el problema planteado en la investigación.

#### **2.4.2 Instrumentos de recolección de datos**

Según Arias ( 2012), cualquier recurso, dispositivo o formato, que se emplea para obtener, registrar o almacenar de datos es un instrumento de recolección de información.

#### **Registro histórico de caudales**

La obtención de los caudales máximos instantáneos que circulan por el tramo de análisis se obtendrá de la estación hidrométrica Puente Ñácar-Chulucanas, administrado por el Proyecto Especial Chira Piura y Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), que servirá para el análisis estadístico a fin de obtener los caudales máximos para diferentes periodos de retorno.

#### **Instrumentos para el análisis granulométrico.**

El análisis granulométrico en la zona del proyecto se obtendrá a partir de los datos del estudio geotécnico elaborado por la entidad responsable de los recursos hídricos a nivel nacional denominada Autoridad Nacional del Agua (2014) en su proyecto denominado: Tratamiento del cauce del río Piura para el control de inundaciones, que servira para la estimación de la rugosidad de Manning en el lecho del cauce principal..

#### **2.5 Procedimiento**

El procedimiento a seguir para el desarrollo del proyecto de investigación se detalla a continuación:

- a) Revisión de imágenes satelitales historicas de la zona del proyecto a traves de Google Earth.
- b) Visita a campo para verificación de información topografica, cobertura vegetal, estructuras existentes, etc.

- c) Revisión del registro de caudales máximos instantaneos.
- d) Revisión de estudios de mecánica de suelos existentes en la zona del proyecto ( curva granulometrica).
- e) Estimación de caudales máximos para diferentes periodos de recurrencia.
- f) Construcción y calibración de modelo hidráulico bidimensional en HECRAS 6.1.
- g) Modelamiento hidráulico en HECRAS con caudales para periodo de recurrencia de 10, 25, 50,100 y 200 años.

## **2.6 Método de análisis de datos.**

Para el análisis de datos se empleó la técnica de “Modelamiento hidráulico mediante la herramienta HECRAS en su versión 6.1”. Por lo consiguiente, estos resultados obtenidos se interpretaron mediante diagramas vistos en unas esquemas y gráficos, donde se interpreta y se formula conclusiones.

Es necesario señalar además la gran aceptabilidad y confiabilidad del software HECRAS en proyectos hidráulicos a nivel internacional.

## **2.7 Aspectos éticos.**

En este estudio nos apoyaremos en diversos aspectos éticos, donde desarrollaremos un entorno de motivación y buena relación con los investigadores, la sociedad y el lugar en donde desarrollaremos nuestro estudio, logrando un aporte al bienestar y seguridad de la localidad de La Encantada. Teniendo siempre el respeto por la propiedad intelectual, responsabilidad social y protección del medio ambiente.

### III. RESULTADOS

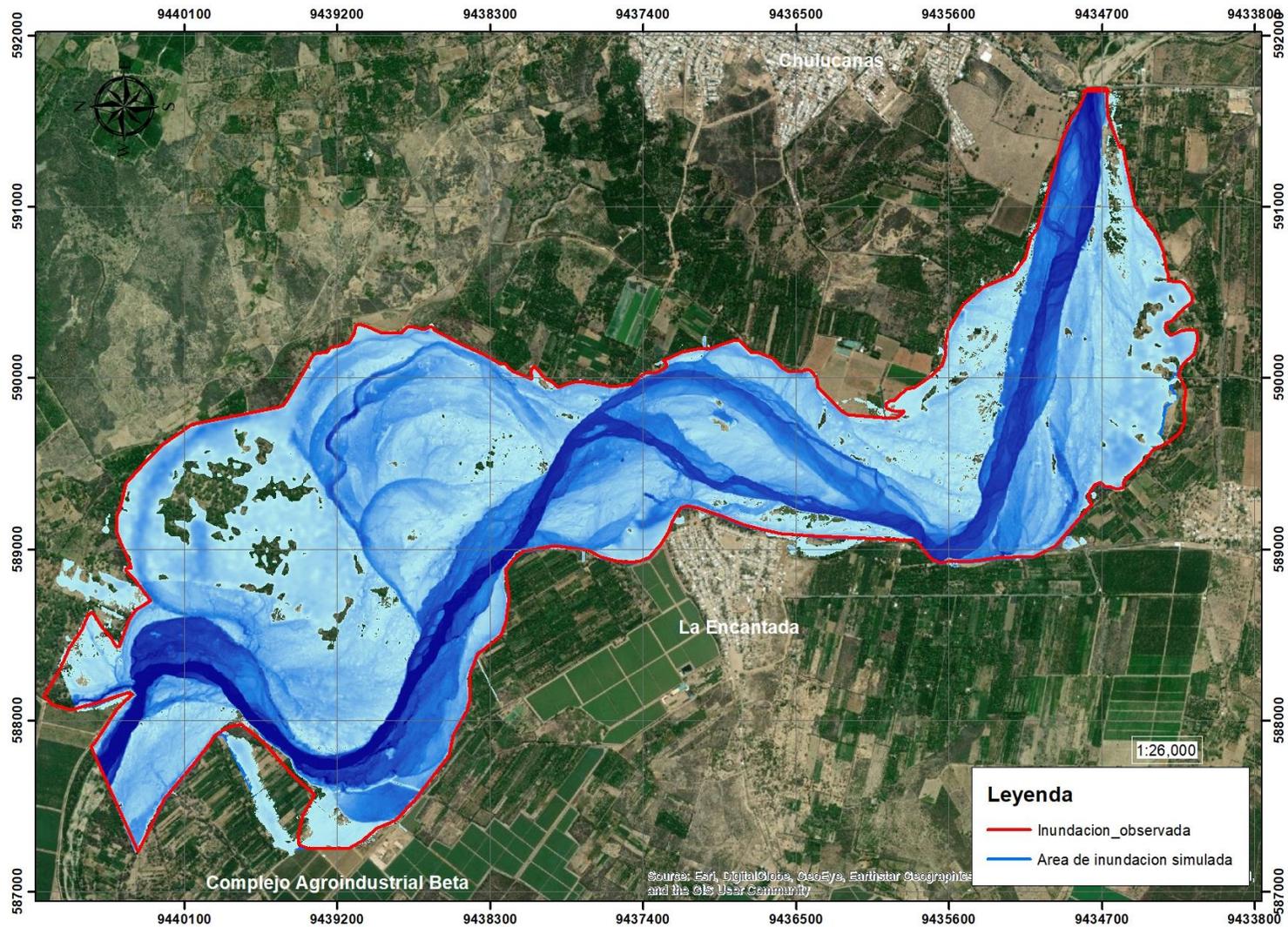
Con relación al primer objetivo específico se han obtenido los resultados que se muestran en la Tabla 2, en donde se detallan los caudales máximos asociados a su probabilidad de excedencia y riesgo para los periodos de recurrencia de 10, 25, 50, 100 y 200 años obtenidos de la prueba de bondad de ajuste de la distribución teórica Gamma 2P. De los resultados se obtuvo que la distribución Gamma 2P es la distribución estadística que más se ajusta al conjunto de datos en la series de caudales máximos instantáneos aforados en el periodo de 1972 a 2019 en la estación hidrométrica del puente Nácara.

**Tabla 2** Caudales determinados para diferentes periodos de recurrencia.

**Fuente:** Elaboración propia.

<b>T</b>	<b>Probabilidad p(Q&lt;q)</b>	<b>Riesgo p(Q&gt;q)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>
<b>5</b>	80.0%	20.0%	<b>1110</b>
<b>10</b>	90.0%	10.0%	<b>1510</b>
<b>25</b>	96.0%	4.0%	<b>2020</b>
<b>50</b>	98.0%	2.0%	<b>2395</b>
<b>100</b>	99.0%	1.0%	<b>2800</b>
<b>200</b>	99.5%	0.5%	<b>3120</b>

Con relación al segundo objetivo específico se re realizado la construcción y calibración del modelo hidráulico. De los resultados obtenidos la calibración del modelo se ha realizado a través de la comparación de áreas de inundación real y simulada como se muestra en la figura 3, los resultados logrados son muy similares a la inundación real por lo que se considera que los parámetros empleados representan adecuadamente el evento simulado, del análisis de áreas se ha obtenido una superficie inundada según el modelo hidráulico de 1044.5 Ha, mientras la superficie real obtenida de la imagen satelital es de 1085.8 Ha, es decir tenemos una diferencia entre las áreas menor al 4%.

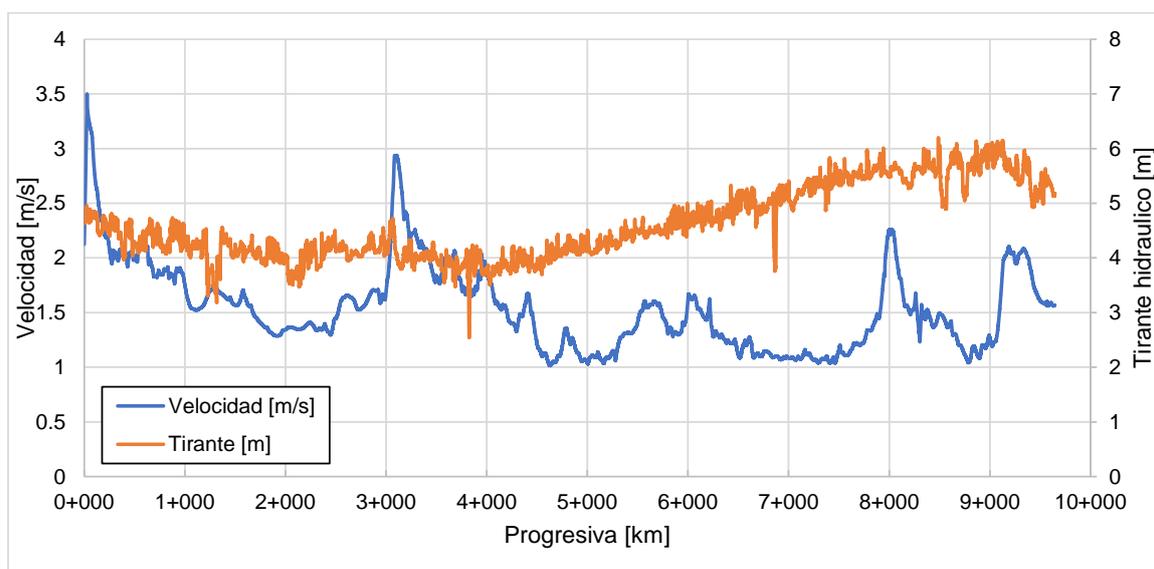


**Figura 3** Área de inundación real y simulada en el evento de marzo del 2017 (Niño Costero).

**Fuente:** Elaboración propia.

Con relación al tercer objetivo específico se ha determinado los parámetros y variables hidráulicas para el río Piura en el Sector La Encantada.

De los resultados logrados en el estudio en la simulación hidráulica del flujo definido para un periodo de recurrencia de 10 años, se observa que los valores de tirantes hidráulico varían entre 2.50 a 6.20 metros a lo largo del cauce principal en el tramo de estudio, mientras que las velocidades varían entre 1.0 y 3.5 m/s. Se puede mencionar que las máximas velocidades se generan inmediatamente aguas abajo del puente Ñácara a causa del estrechamiento. Figura 4.

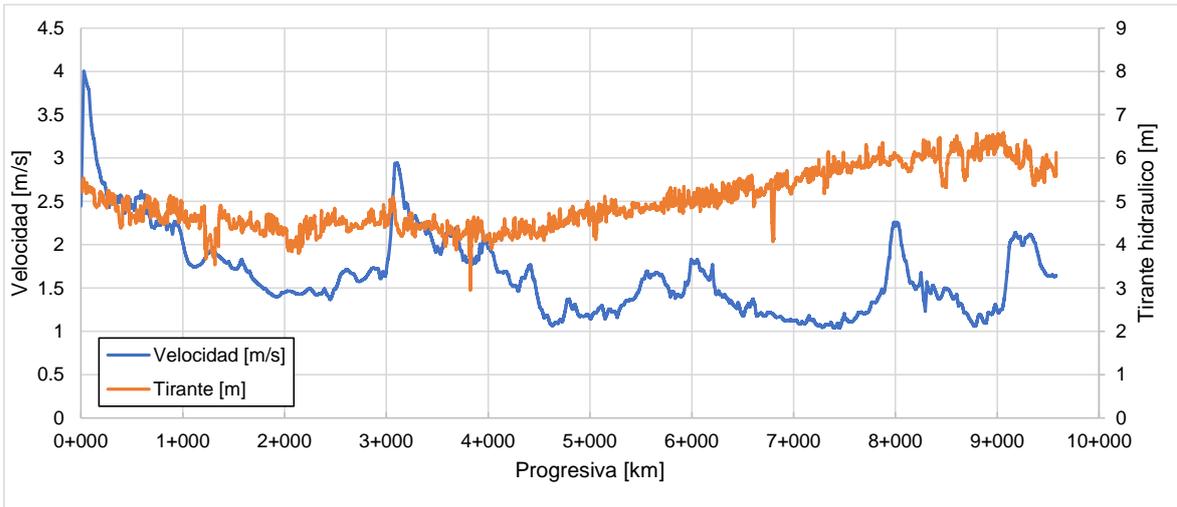


**Figura 4** Velocidades y tirantes hidráulicos para 1510 m<sup>3</sup>/s (Tr = 10)

**Fuente:** Elaboración propia

De los resultados logrados en la simulación hidráulica del flujo definido para un periodo de recurrencia de 25 años, se observa que los valores de tirantes hidráulico varían entre 3.0 a 6.50 metros a lo largo del cauce principal en el tramo de estudio, mientras que las velocidades varían entre 1.05 y 4.0 m/s, ver Figura 5.

De los resultados obtenidos para un flujo de 2020 m<sup>3</sup>/s definido para un periodo de recurrencia de 25 años, se genera la inundación de la margen izquierda del río Piura entre las progresivas km 2+000 a 4+000, km 7+500 a 9+500, de aproximadamente 260 Ha de predios agrícolas.

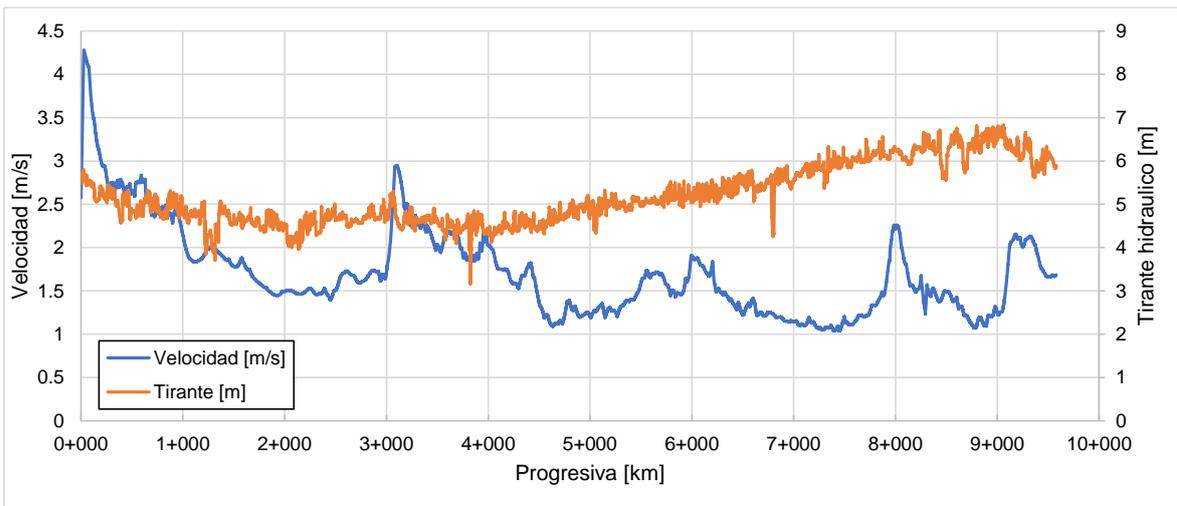


**Figura 5** Velocidades y tirantes hidráulicos para 2020 m<sup>3</sup>/s (Tr = 25)

**Fuente:** Elaboración propia

De los resultados obtenidos en la simulación hidráulica del flujo definido para un periodo de recurrencia de 50 años, se observa que los valores de tirantes hidráulico varían entre 3.2 a 6.85 metros a lo largo del cauce principal en el tramo de análisis, mientras que las velocidades varían entre 1.05 y 4.3 m/s, ver Figura 6.

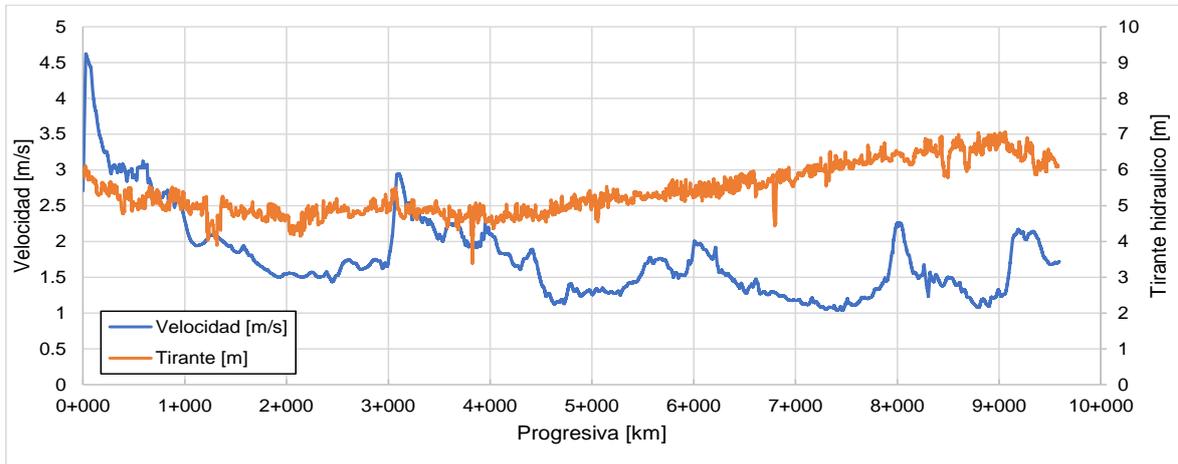
Además, que para un flujo de 2395 m<sup>3</sup>/s correspondiente a un periodo de recurrencia de 50 años, se genera la inundación de la margen izquierda del río Piura entre las progresivas km 2+000 a 4+000, Km 4+000 a 5+000 y km 7+500 a 9+500, de aproximadamente 365 Ha de terrenos agrícolas.



**Figura 6** Velocidades y tirantes hidráulicos para 2395 m<sup>3</sup>/s (Tr = 50)

**Fuente:** Elaboración propia

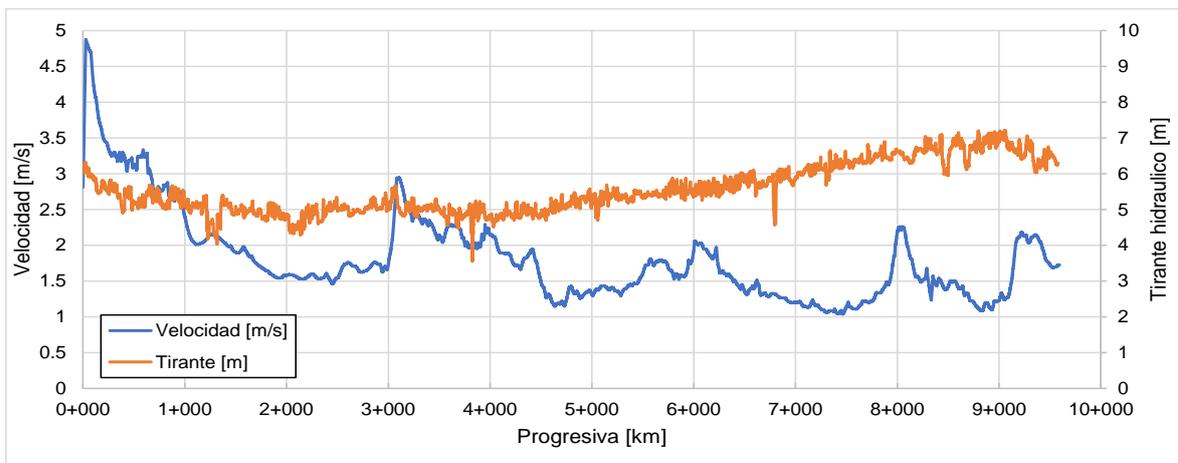
De los resultados logrados en la simulación hidráulica del flujo definido para un periodo de recurrencia de 100 años, se observa un régimen gradualmente variado con valores de tirantes hidráulico que varían entre 3.4 a 7.0 metros a lo largo del cauce principal en el tramo de estudio, mientras que las velocidades varían entre 1.5 y 4.6 m/s, ver Figura 7.



**Figura 7** Velocidades y tirantes hidráulicos para 2800 m<sup>3</sup>/s (Tr = 100)

**Fuente:** Elaboración propia

Además de resultados obtenidos en la simulación hidráulica del flujo definido para un periodo de recurrencia de 200 años, se observa un régimen gradualmente variado con valores de tirantes hidráulico que varían entre 4.0 a 7.20 metros a lo largo del cauce principal en el tramo de estudio, mientras que las velocidades varían entre 1.1 y 4.85 m/s, ver Figura 8.



**Figura 8** Velocidades y tirantes hidráulicos para 3120 m<sup>3</sup>/s (Tr = 200)

**Fuente:** Elaboración propia

#### IV. DISCUSION

Con relación al objetivo principal del estudio el cual es estudiar el comportamiento hidrodinámico del río Piura en el Sector La Encantada empleando el módulo bidimensional de la herramienta HECRAS (River Analysis system) en su versión 6.1, se ha logrado obtener las principales características hidráulicas que describen la hidrodinámica de un sistema fluvial, además de representar a detalle el régimen subcrítico del flujo a lo largo de los 9.5 kilómetros del río Piura, con umbrales de número de Froude entre 0.1 y 0.65, se puede señalar que aguas abajo del Puente Ñácara debido al estrechamiento de esta estructura transversal al flujo, las velocidades llegan hasta un valor de 4.50 m/s con tirantes hidráulicos de hasta 6.85 m, además de elevadas fuerzas tractivas que se encuentran en el orden de 150 N/m<sup>2</sup>, lo que nos indica las fuertes erosiones generadas durante crecidas en esta zona para un flujo de 2800 m<sup>3</sup>/s definido para un periodo de recurrencia de 100 años. También se ha logrado representar a detalle los niveles de lámina de agua, tirantes hidráulicos y velocidades del cauce principal y las extensas planicies de inundación. Los resultados obtenidos han permitido identificar las zonas inundables a lo largo de todo el tramo en estudio, evidenciando el alto riesgo ante inundación de la Localidad La Encantada, así como las áreas agrícolas del complejo agroindustrial Beta, además del alto grado de erosión lateral por las altas velocidades que se desarrollan en el cauce principal en las zonas donde se aproxima a los márgenes. Además de que los resultados obtenidos muestran las potencialidades y ventajas de la aplicación de modelos numéricos para evaluar y analizar sistemas fluviales tal como lo señalan Maza (2019) y Córdova (2020) quienes desarrollaron investigaciones empleando HECRAS en sus módulos 1D y 2D para estudiar y analizar la hidrodinámica del río Piura para flujos con diferentes periodos de recurrencia. Analizando los resultados obtenidos se puede mencionar la importancia y bajo costo de la aplicación de esta herramienta a la solución de cálculos hidráulicos y diseño de infraestructura de protección ribereña en sistemas fluviales.

Con relación al primer objetivo específico de determinar los flujos máximos para diferentes periodos de recurrencia, los resultados obtenidos mediante métodos estadísticos basados en el análisis de frecuencia de las crecidas, muestran que la

función teórica que más se adapta a la data de flujos máximos instantáneos aforados en el puente Ñácara es la distribución teórica Gamma 2P, cuyos resultados indican que para un periodo de recurrencia de 10 años se obtiene un caudal correspondiente a 1510 m<sup>3</sup>/s, para un periodo de recurrencia de 25 años se obtiene un caudal de 2020 m<sup>3</sup>/s, para un periodo de recurrencia de 50 años un flujo máximo de 2395 m<sup>3</sup>/s, para un periodo de recurrencia de 100 años se obtiene un caudal de 2800 m<sup>3</sup>/s, mientras que para un periodo de recurrencia de 200 años se tiene un flujo máximo de 3120 m<sup>3</sup>/s. Estos resultados son próximos a los obtenidos en el estudio del ANA (2014) denominado Tratamiento del cauce del río Piura para el control de inundaciones en donde determinan flujos para periodos de recurrencia de la estación hidrométrica Ñácara aplicando métodos estadísticos. Los resultados obtenidos de este estudio señalan que para un periodo de retorno de 50 años se obtiene un caudal igual a 2307 m<sup>3</sup>/s y para un periodo de retorno de 100 años un caudal máximo de 2715 m<sup>3</sup>/s. Además, Palacios (2010) en su estudio de los caudales de diseño en el río Piura y su variación temporal ante el fenómeno El Niño presenta un análisis estadístico de la serie de la misma estación hidrométrica, donde los resultados son próximos a los obtenidos en este trabajo de investigación señalando un caudal de 2251 m<sup>3</sup>/s para un periodo de recurrencia de 50 años mientras que un caudal de 2673 m<sup>3</sup>/s para un periodo de recurrencia de 100 años. Analizando estos resultados podemos señalar existe una ligera variación en los caudales máximos, esto se debe principalmente a la extensión de la serie analizada en cada estudio, sin embargo, los valores obtenidos muestran un muy buen ajuste según los test de prueba estadísticos de Anderson Darling, Chi cuadrado y Kolmogorov Smirnov.

Del segundo objetivo específico desarrollado de construir y calibrar un modelo hidráulico bidimensional empleando el módulo bidimensional del software HECRAS en su versión 6.1, se utilizó imágenes satelitales aéreas de las plataformas Sentinel 2, Google Earth, Landsat, Glovis durante los días de la crecida a fin de aproximarse a la huella o área de inundación real a través del ajuste de parámetros hidrodinámicos como el coeficiente de resistencia al flujo ( $n$  de Manning). Los resultados obtenidos mostraron un buen ajuste de la superficie inundada y el área de inundación simulada con el modelo hidráulico logrando obtener una diferencia en áreas menor al 4 %, esto quiere decir que el modelo construido representa a

detalle el evento simulado, por lo que es una herramienta potente, eficiente y robusta para evaluar crecidas con diferentes periodos de recurrencia, también de conocer el comportamiento hidráulico de estructuras hidráulicas emplazadas en el río. Estos resultados muestran la ventaja de aplicar un análisis multitemporal de fotografías satelitales sobre la zona de estudio para la calibración de modelos hidráulicos en sistemas fluviales tal como lo señala Córdova (2020) en su trabajo donde analizó la hidráulica y el transporte de sedimentos del río Piura en el sector delimitado por la presa Los Ejidos hasta el Sector Cordillera, además de identificar la problemática actual y plantear propuestas de solución, aquí el autor resalta el uso de esta información satelital para la calibración, validación y optimización de modelos hidráulicos. Del análisis de los resultados logrados en este estudio se puede señalar que gracias a la calibración de modelo hidráulico numérico se ha podido brindar una buena aproximación a la representación del comportamiento del flujo del río Piura en el Sector La Encantada.

Con relación al tercer objetivo específico de determinar las variables y parámetros hidráulicos del río Piura sector La Encantada a través de un modelo numérico hidráulico bidimensional, se representó el evento extraordinario del Niño Costero producido en el mes de marzo del año 2017, además de analizar la hidrodinámica para flujos máximos correspondiente a periodos de recurrencia de 10, 25, 50, 100 y 200 años de los cuales se obtuvo tirantes hidráulicos máximos, velocidades máximas, números de Froude y tensiones del flujo a lo largo del cauce principal del río así como en las planicies de inundación además de mostrar las áreas de inundación para cada escenario de modelación realizado. Para un flujo de 1510 m<sup>3</sup>/s definido para el periodo de recurrencia de 10 años se obtuvo un tirante hidráulico máximo de 6.15 m con velocidades de hasta 3.4 m/s a lo largo del cauce principal, de la misma forma para un flujo de 2020 m<sup>3</sup>/s definido para el periodo de recurrencia de 25 años los tirantes se incrementaron hasta 6.58 metros y velocidades máximas en el orden de 4 m/s y velocidades promedio a lo largo de cauce principal de 1.65 m/s, para un flujo de 2395 m<sup>3</sup>/s definido para el periodo de recurrencia de 50 años el tirante máximo alcanza un valor de hasta 6.82 metros con velocidades máximas de 4.30 m/s, mientras que para un caudal de 2800 m<sup>3</sup>/s correspondiente a un periodo de retorno de 100 años las velocidades se incrementan hasta un máximo de 4.6 m/s con tirantes hidráulicos de 7.05 metros y

una velocidad de promedio a lo largo de cauce principal de 1.70 m/s . Estos resultados muestran la ventaja de la aplicación de modelo bidimensionales en cauces naturales con bajas pendientes y amplias llanuras de inundación como lo indica Córdova (2020), Castro y Willems (2011) quienes rescatan además el creciente interés en la modelación numérica de eventos extraordinarios de ríos debido a las crecidas de ocurridas en las últimas décadas, a fin de reducir riesgos y costos de daños generados. De la evaluación de los resultados obtenidos se puede señalar que la evaluación de las principales variables hidráulicas obtenidas del modelo hidráulico son una herramienta base para la planificación de obras fluviales emplazada en las riberas y cauces, además de que es un factor clave en la prevención ante desastres naturales, por lo que al igual que Castro y Willems (2011) se coincide en que esta información debe ser tomada por las autoridades y organismos relacionados con la gestión y planificación de los recursos hidráulicos de la cuenca baja, media y alta del río Piura a fin de minimizar la vulnerabilidad física y riesgo ante inundaciones.

## V. CONCLUSIONES

A partir de la aplicación de la herramienta de modelación numérica Hecras en su versión 6.1, se ha representado a detalle la hidrodinámica del flujo del río Piura en el Sector La Encantada, por lo que se ha podido demostrar la eficiencia, precisión y potencia de este software en el estudio y evaluación de sistemas fluviales.

A través del análisis estadístico realizado en el trabajo de investigación se determinó los flujos máximos para los periodos de recurrencia de 10, 25, 50, 100 y 200 años, lo más importante en la determinación de estos valores fue la existencia de información, la cual contenía a los eventos extremos máximos ocurridos hasta la fecha, es decir los flujos transitados durante los años de 1983, 1998, 2017, esto sirvió de gran ayuda a realizar un mejor análisis en la determinación de los caudales máximos con diferentes periodos de recurrencia.

Se realizó la calibración del modelo hidráulico a partir del análisis multitemporal de imágenes satelitales durante el periodo de la crecida del FEN 2017 a partir de cual se obtuvo el área de inundación máxima ocurrida en marzo del 2017, esta se comparó con el área de inundación máxima del modelo hidráulico resultando muy similares representando de esta forma el evento simulado.

Se obtuvieron las principales variables y parámetros hidráulicos del río Piura sector La Encantada para caudales con diferentes periodos de recurrencia. Para el flujo de 2800 m<sup>3</sup>/s definido para un periodo de recurrencia de 100 años, el régimen en todo sector analizado representa un flujo gradualmente variado, desarrollando un calado hidráulico medio de 5.40 m y una velocidad media de 1.8 m/s. Se puede concluir que las velocidades máximas se generan a la salida del puente Ñácara en donde el flujo alcanza valores de hasta 4.60 m/s con un tirante hidráulico máximo de 6.0 metros de altura.

## **VI. RECOMENDACIONES**

Se recomienda a las instituciones responsable de la planificación y manejo de los recursos hidráulicos de la cuenca alta, media y baja del río Piura realizar un mantenimiento periódico de las estructuras de protección ribereña existente en el sector La Encantada, con el fin de reducir los niveles de riesgo ante fenómenos extremos como El Niño.

Recomendamos a las autoridades involucradas en el tratamiento integral del río Piura la modernización del sistema de alerta temprana, con el objetivo de minimizar los daños ocasionados por los desbordes además de evitar el deceso de vidas humanas, así como pérdidas económicas por el colapso de la infraestructura básica y productiva del departamento de Piura.

Se recomienda tener el criterio a la hora de analizar los resultados logrados de los modelos numéricos con el fin de reducir errores que conlleven a malos diseños, así como deficiencias en proyectos de ingeniería.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvaro Aguilar, L. M., & Henríquez Fasanando, L. (2014). *Diseño hidraulico y estructural de la defensa ribereña del río Chicama, tramo puente Punta Moreno-Pampas de Jaguey aplicando el programa River*. Trujillo: Universidad Privada Antenor Orrego.
- ANA. (2008). *Estudio de Delimitación y Codificación de las Unidades Hidrográficas del Perú*. Lima: Autoridad Nacional Del Agua.
- ANA. (2014). *Tratamiento de cauce del río Piura para el control de inundaciones*. Piura.
- ANA. (2015). *Proyecto de Modernización de la Gestion de los Recursos Hidricos-PMGRH*. Piura.: Autoridad Nacional del Agua.
- ANA. (2019). *Delimitación de fajas marginales del río Piura Sector La Joya-Balcones*. Piura.
- Arias, F. (2012). *El proyecto de investigación*. Caracas: Episteme, C.A.
- Basile, P. A. (2000). *Modelo Matemático hidro-morfo-sedimentológico para ríos con lechos constituídos por granulometría extendida*. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Bladé, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Modelación numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería del agua*, 71-82. doi:<https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>
- Borja, M. (02 de febrero de 2012). *Metodología de la investigación científica para ingenieros*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/manborja/metodologia-de-inv-cientifica-para-ing-civil>
- Castro, L., & Willems, P. (2011). Desempeño de modelos hidraulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones. *MASKANA*, 91-98.
- CONIDA. (2017). *Productos desarrollados inundaciones Perú 2017*. Lima.: Agencia Espacial del Perú. Recuperado el 5 de febrero de 2020, de <https://geocatalogo.jimdofree.com/descargas-2/productos/>
- COPERNICUS. (2017). *EMSR199: Inundaciones en Perú*. Piura.: Copernicus Europe's eyes on Earth-European Union. Recuperado el 5 de febrero de 2020, de <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR199>

- Cordova, E. Y. (2020). *Análisis del Comportamiento hidráulico Sedimentológico del río Piura, tramo presa Los Ejidos- Sector Cordillera. Problemática actual y propuestas de solución*. Valencia.
- Córdova, E. Y., & Castillo, Z. P. (2017). *Modelación hidráulica bidimensional del río Piura sector La Huaquilla*. Lambayeque.: VIII Congreso Latinoamericano y del Caribe de estudiantes de ingeniería Agrícola y VIII Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Agrícola.
- Fidias, A. (2012). *El proyecto de investigación*. Episteme C.A.
- García, F. M., & Maza, Á. J. (1996). *Manual de Ingeniería de ríos.[ Capítulo 7- Origen y propiedades de los sedimentos]*. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
- González, D. T., & García, D. J. (2001). *Restauración de ríos y riberas*. Madrid: Mundi-Prensa Libros, s.a.
- IECO. (1965). *Estudio de planificación aprovechamiento de agua de las cuencas Piura y Chira y Estudio de factibilidad Valle del Chira desarrollado*. Piura: Proyecto Especial Chira Piura.
- Martín, V. J. (2001). *Ingeniería de ríos*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Ochoa, S. A. (2014). *Evaluación de modelos hidrodinámicos para representar flujos en cauces naturales: aplicación en un tramo del Río Suquia que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada, Provincia de Córdoba*. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Ojeda Franco, N. (2018). *Modelación numérica del comportamiento hidrodinámico del río Arauca, en el sector de "Boca de gaviotas", en el municipio de Arauquita, Colombia*. Colombia: Universidad de los Andes.
- Orellana Cabello, R. (2021). *Modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura utilizando HEC-HMS Y HEC-RAS*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Palacios, C. (2010). *Caudales de diseño en el río Piura y su variación histórica ante el fenómeno el Niño*. Piura: UDEP.

- Reyes Salazar, J., Maza Sócola, J., & Martin Vide, J. (2019). Análisis del comportamiento hidráulico del río Piura, en presencia de fenómeno del Niño. *Jornadas de Ingeniería del Agua*, 23-24.
- Rincón, J., & Perozo, M. (2014). Comportamiento hidraulico de la quebrada Atarigua en el cruce con el puente ubicado sobre la troncal 7, Municipio Jimenez, Edo. Lara. *Revista Ingeniería UC*, 77 - 86.
- Rocha, F. A. (1998). *Introducción a la hidraulica fluvial*. Lima: Universidad Nacional de Ingenieria.
- Rodriguez Iturre, I. (2018). *Modelamiento hidrodinámico del tramo urbano del rio Huarmey con fines de ubicación y diseño de una estructura de contención, región Áncash*. Lima: Universidad Cesar Vallejo.
- Tamayo, M. (1999). *El proceso de la investigación científica*. Mexico: Limusa. S.A.
- USACE. (2016b). *HEC-RAS River Analysis System [Hydraulic Reference Manual]*. Davis: U.S Army Corp of Engineers.
- USACE. (2021). *River Analysis system :2D Modeling User's Manual*. Davis: US Army Corps of Engineers [ Institute for Water Resources].
- Ven Te Chow. (2004). *Hidraulica de Canales abiertos*. Colombia: Nemos S.A.

## **ANEXOS**

**Anexo 1: Matriz de operacionalización de variables**

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Comportamiento hidráulico del río Piura, sector La Encantada.	El comportamiento hidráulico representa el funcionamiento del flujo en lamina libre a lo largo de un sistema fluvial, además de estudiar las principales variables hidráulicas a lo largo del cauce como; velocidad media del flujo, tirantes hidráulicos, fuerzas tractivas, etc. además de representar las zonas inundables teniendo como datos de entrada el caudal máximo, topografía, rugosidad de Manning. (Cordova, 2020)	Se realiza el análisis del comportamiento hidráulico en el río Piura Sector La Encantada para analizar las principales variables hidráulicas que se generan en el cauce, además de visualizar las áreas inundables a lo largo del tramo de estudio.	Estudio hidrológico	Caudales máximos instantáneos (m <sup>3</sup> /s)
				Periodos de retorno (años)
			Modelo hidráulico bidimensional	Modelo Digital del Terreno (MDT)
				Tamaño de malla bidimensional
				Tiempo de cálculo
				Condiciones iniciales y de contorno.
			Variables y parámetros hidráulicos.	Coeficiente de rugosidad de Manning
				Tirantes hidráulicos
				Velocidades
				Áreas de inundación

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 2:** Matriz de consistencia

TITULO	PROBLEMA	OBJETIVOS	
		GENERAL	ESPECIFICO
<p>Aplicación de la herramienta HECRAS 6.1 para el análisis del comportamiento hidráulico del río Piura sector La Encantada, Distrito de Chulucanas – Piura.</p>	<p>¿En qué medida la aplicación de la herramienta Hecras 6.1 permitirá analizar el comportamiento hidráulico del río Piura sector La Encantada, distrito de Chulucanas - Piura?</p>	<p>Analizar el comportamiento hidráulico del río Piura en el Sector La Encantada, Distrito de Chulucanas - Piura.</p>	<p>Determinar los caudales máximos para periodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 200 años en el río Piura Sector La Encantada.</p>
			<p>Construir y calibrar un modelo hidráulico bidimensional en el software HECRAS 6.1 para el río Piura, Sector La Encantada.</p>
			<p>Determinar las variables y parámetros hidráulicos del río Piura sector La Encantada.</p>

Fuente: Elaboración propia



**FORMATO ENSAYOS DE LABORATORIO  
 (NORMA NTP 339.128)**

SOLICITANTE :		
PROYECTO :		
CALICATA :		
COORDENADAS :		
		FECHA :

DATOS DEL ENSAYO		
CALICATA :		
MUESTRA :		
PROF. (m) :		

DATOS DE ENSAYO								
TAMIZ	ABERT. mm.	PESO RET.	%RET. PARC.	%RET. AC.	% Q' PASA	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA		
8"	203.200							
7"	177.800							
6"	152.400							
5 1/2"	139.700							
5"	127.000							
4 1/2"	114.300							
4"	101.600							
3 1/2"	88.900					PESO TOTAL = gr		
3"	76.200							
2 1/2"	63.500					PESO FRACCIÓN FINO = gr		
2"	50.800					LÍMITE LÍQUIDO = %		
1 1/2"	38.100					LÍMITE PLÁSTICO = %		
1"	25.400					ÍNDICE PLÁSTICO = %		
3/4"	19.100					CLASF. AASHTO = ( )		
1/2"	12.700					CLASF. SUCS =		
3/8"	9.520							
# 4	4.760							
# 8	2.380							
# 10	2.000							
# 16	1.190							
# 20	0.840							
# 30	0.590							
# 40	0.420					CONT. DE HUMEDAD = %		
# 50	0.300							
# 80	0.177							
# 100	0.149							
# 200	0.074							
< # 200	FONDO							
						Coef. Uniformidad		Índice de Consistencia
						Coef. Curvatura		
						Pot. de expansión		
Descripción suelo:								

**CONSTANCIA**

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN**

Por la presente se deja constancia de haber revisado los instrumentos de investigación para ser utilizados en la investigación, cuyo título es:

“Aplicación de la herramienta HECRAS 6.1 para el análisis del comportamiento hidráulico del río Piura sector La Encantada, Distrito de Chulucanas – Piura”, cuyo autor es Yoel Esleiter Córdova Elera, estudiante de la escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad César Vallejo- Campus Piura.

Dichos instrumentos serán aplicados a la investigación, por lo que cuenta con la validez y confiabilidad correspondiente considerando las variables del trabajo de investigación.

Se entiende la presente constancia a solicitud del interesado para los fines que considere pertinentes.

Piura 03 de marzo del 2022.



ARNOLD JERSON  
CARRASCO JOCOPE  
INGENIERO AGRICOLA  
Reg. CIP N° 205620

M.Sc. Ing. Arnold Jerson Carrasco Jocopec  
CIP: 205620  
DNI: 70549790

**CUESTIONARIO PARA INGENIEROS ESPECIALISTAS EN HIDRAULICA**

Fecha: 03 de marzo del 2022

**INSTRUCCIÓN**

Estimado Ingeniero, las preguntas que a continuación se formulan, forman parte de una investigación encaminada a explicar la aplicación de la herramienta HECRAS 6.1 para el análisis del comportamiento hidráulico del río Piura sector La Encantada, Distrito de Chulucanas – Piura, para lo cual necesitamos de tu colaboración y apoyo, respondiendo según su experiencia. Para lo cual marcaras en uno de los recuadros teniendo en cuenta que:

MI: Muy insatisfactorio      MD: Moderadamente insatisfactorio      MN: Ni satisfactorio ni insatisfactorio  
S: Satisfactorio      MS: Muy Satisfactorio.

Nº	ITEMS	1	2	3	4	5
		MI	MD	MN	S	MS
1	¿Como califica según su experiencia, la aplicación de la herramienta HECRAS 6.1 para analizar el comportamiento hidráulico en ríos?					X
2	¿Como califica según su experiencia, la determinación de caudales máximos para diferentes periodos de retorno a partir de análisis estadísticos?				X	
3	¿Como califica según su experiencia, la calibración de modelos hidráulicos a partir de imágenes satelitales?				X	
4	¿Como califica según su experiencia la determinación de variables y parámetros hidráulicos a partir de la aplicación del software HECRAS 6.1?					X
5	¿Como califica según su experiencia la determinación de áreas de inundación en sistemas fluviales a partir de la aplicación de la herramienta HECRAS 6.1?					X



-----  
ARNOLD JERSON  
CARRASCO JOCOPE  
INGENIERO AGRICOLA  
Reg. CIP Nº 205620

**CONSTANCIA**

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN**

Por la presente se deja constancia de haber revisado los instrumentos de investigación para ser utilizados en la investigación, cuyo título es:

“Aplicación de la herramienta HECRAS 6.1 para el análisis del comportamiento hidráulico del río Piura sector La Encantada, Distrito de Chulucanas – Piura”, cuyo autor es Yoel Esleiter Córdova Elera, estudiante de la escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad César Vallejo- Campus Piura.

Dichos instrumentos serán aplicados a la investigación, por lo que cuenta con la validez y confiabilidad correspondiente considerando las variables del trabajo de investigación.

Se entiende la presente constancia a solicitud del interesado para los fines que considere pertinentes.

Piura 03 de marzo del 2022.



Fernando Rivas Alvarado  
INGENIERO AGRÍCOLA  
Reg. C.I.P. N° 153331

M.Sc. Ing. Fernando Rivas Alvarado  
CIP: 153331  
DNI: 44554734

**CUESTIONARIO PARA INGENIEROS ESPECIALISTAS EN HIDRAULICA**

Fecha: 03 de marzo del 2022

**INSTRUCCIÓN**

Estimado Ingeniero, las preguntas que a continuación se formulan, forman parte de una investigación encaminada a explicar la aplicación de la herramienta HECRAS 6.1 para el análisis del comportamiento hidráulico del río Piura sector La Encantada, Distrito de Chulucanas – Piura, para lo cual necesitamos de tu colaboración y apoyo, respondiendo según su experiencia. Para lo cual marcaras en uno de los recuadros teniendo en cuenta que:

MI: Muy insatisfactorio      MD: Moderadamente insatisfactorio      MN: Ni satisfactorio ni insatisfactorio  
S: Satisfactorio      MS: Muy Satisfactorio.

Nº	ITEMS	1	2	3	4	5
		MI	MD	MN	S	MS
1	¿Como califica según su experiencia, la aplicación de la herramienta HECRAS 6.1 para analizar el comportamiento hidráulico en ríos?					X
2	¿Como califica según su experiencia, la determinación de caudales máximos para diferentes periodos de retorno a partir de análisis estadísticos?				X	
3	¿Como califica según su experiencia, la calibración de modelos hidráulicos a partir de imágenes satelitales?				X	
4	¿Como califica según su experiencia la determinación de variables y parámetros hidráulicos a partir de la aplicación del software HECRAS 6.1?					X
5	¿Como califica según su experiencia la determinación de áreas de inundación en sistemas fluviales a partir de la aplicación de la herramienta HECRAS 6.1?					X



Fernando Rivas Alvarado  
INGENIERO AGRÍCOLA  
Reg. C.I.P. N° 153331



## CONSTANCIA

### VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN

Por la presente se deja constancia de haber revisado los instrumentos de investigación para ser utilizados en la investigación, cuyo título es:

“Aplicación de la herramienta HECRAS 6.1 para el análisis del comportamiento hidráulico del río Piura sector La Encantada, Distrito de Chulucanas – Piura”, cuyo autor es Yoel Esleiter Córdova Elera, estudiante de la escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad César Vallejo- Campus Piura.

Dichos instrumentos serán aplicados a la investigación, por lo que cuenta con la validez y confiabilidad correspondiente considerando las variables del trabajo de investigación.

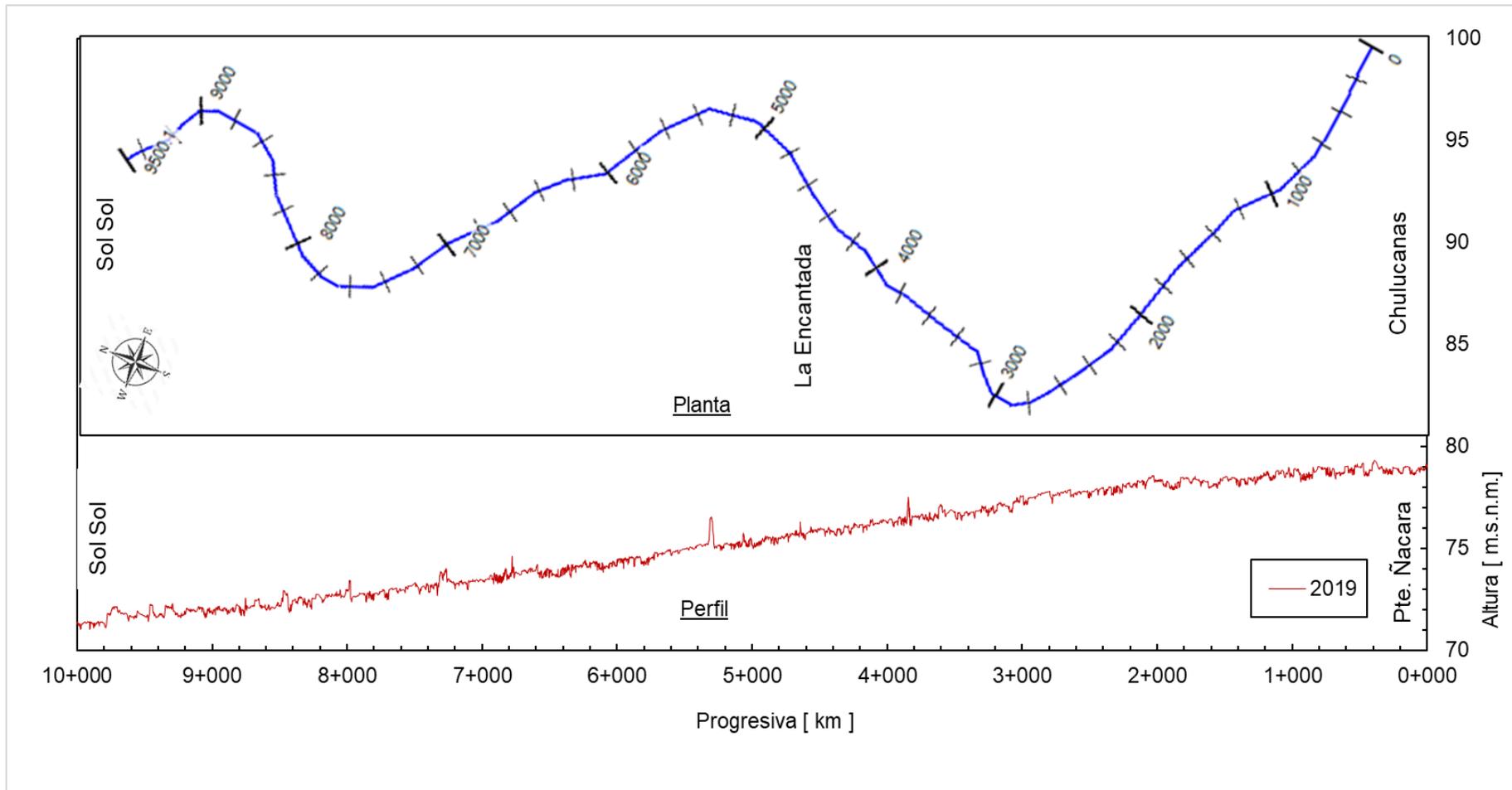
Se entiende la presente constancia a solicitud del interesado para los fines que considere pertinentes.

Piura 16 de marzo del 2022.

M.Sc. Ing. Francisco Torres Medina  
CIP: 215992

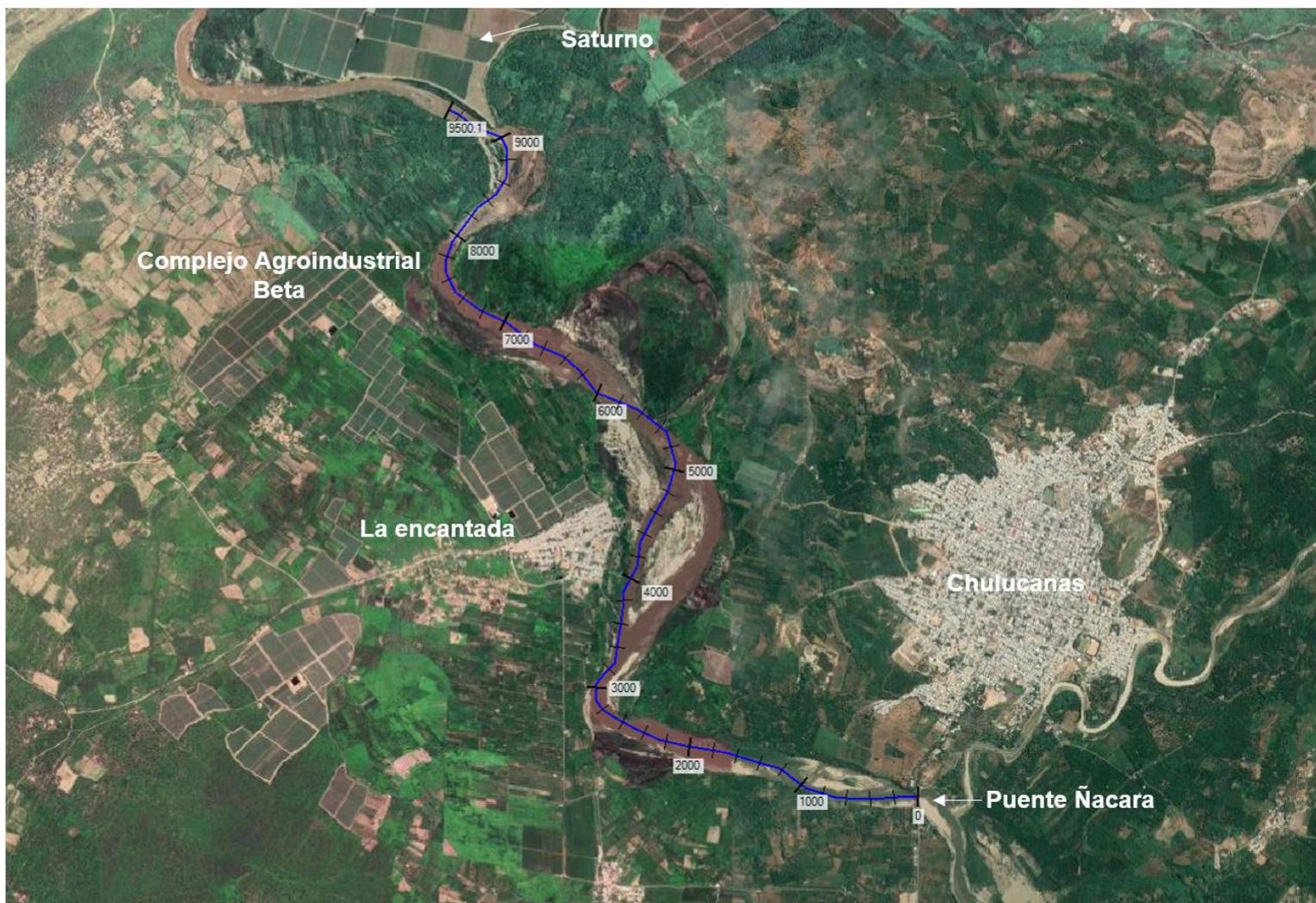


Anexo 4: Planta y perfil longitudinal – Río Piura Sector La Encantada.



Fuente: Elaboración propia

**Anexo 5:** Vista satelital – Río Piura Sector La Encantada.



Fuente: Elaboración propia.

**Anexo 6:** Daños generados por el Fenómeno del Niño Costero en el departamento de Piura -2017

<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO</b>	<b>CANTIDAD</b>
Damnificados	97 708
Afectados	427 693
<b>Fallecidos</b>	<b>20</b>
Heridos	50
Desaparecidos	3
Viviendas afectadas	91 584
Viviendas destruidas e inhabitables	22 120
Centros educativos afectados	1 035
Centros de salud afectados	299
Puentes afectados	106
Puentes destruidos	32
Hectáreas de cultivos Perdidos	10 408
Canales de riego destruidos	6 469
km de carreteras afectadas	1 214
km de carreteras destruidos	416

**Fuente:** (Organización Panamericana de la Salud, 2018)

**Anexo 7: Caudales máximos instantáneo estación puente Ñacara (1972 -2019).**

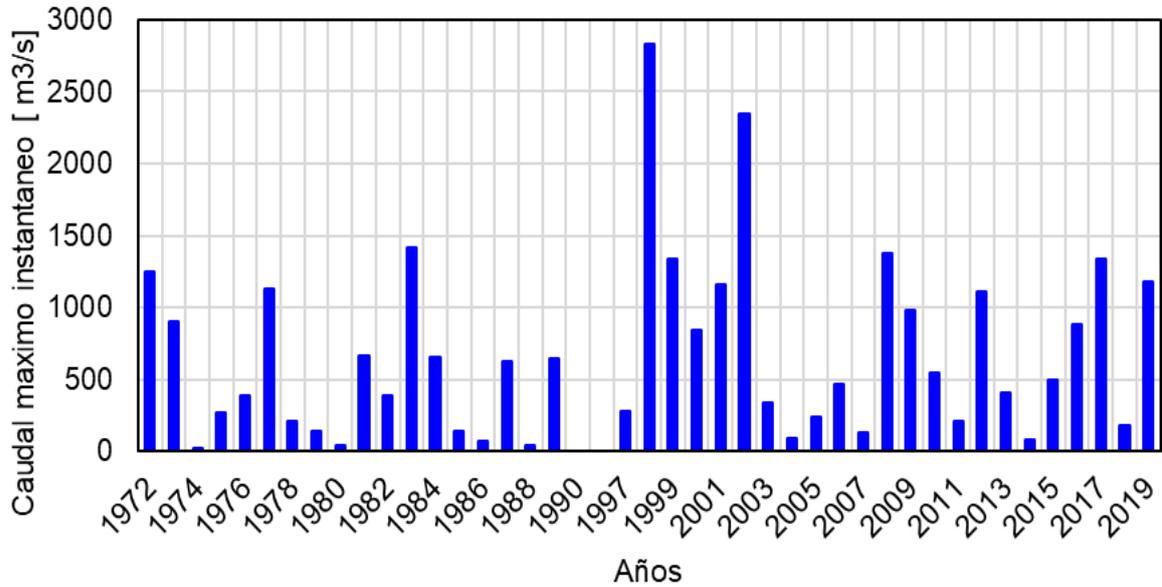
**ESTACION PUENTE ÑACARA  
DESCARGA MAXIMAS INSTANTANEAS EN M3/S**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1972	0.0	240.0	1245.0	560.0	41.5	15.7	8.2	5.7	1.5	0.0	0.0	7.4	1245.0
1973	125.0	900.0	600.0	568.0	58.8	26.0	8.4	3.8	2.3	0.9	0.5	2.0	900.0
1974	4.3	20.4	27.6	1.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.6
1975	0.0	60.0	273.0	159.2	25.9	8.4	6.6	2.5	0.2	0.0	0.0	0.0	273.0
1976	139.0	156.5	389.0	289.0	63.6	15.5	8.2	3.0	0.9	0.3	0.0	0.0	389.0
1977	5.9	321.0	1130.0	256.0	83.5	13.0	5.1	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1130.0
1978	0.0	0.0	211.0	113.0	7.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	211.0
1979	0.0	0.0	139.0	16.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	139.0
1980	0.0	0.0	6.9	39.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.3
1981	0.0	0.0	668.0	40.8	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	668.0
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	390.0	390.0
1983	1160.0	980.0	1420.0	1322.0	1270.0	660.0	100.0	34.0	15.0	13.4	7.0	15.0	1420.0
1984	27.3	590.0	660.0	315.0	60.0	16.5	12.5	6.3	1.7	0.8	1.7	2.1	660.0
1985	15.0	80.8	139.0	18.4	3.2	1.2	0.8	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	139.0
1986	0.0	15.2	35.5	70.4	18.5	2.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	70.4
1987	22.0	189.2	629.0	262.0	262.0	8.7	3.6	1.9	1.0	0.5	0.6	0.0	629.0
1988	0.0	43.0	30.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.0
1989	15.2	452.0	645.0	324.0	43.5	6.9	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	645.0
1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1997												281.5	281.5
1998	757.0	970.0	2831.1	2684.1	864.6	165.0	95.0	29.7					2831.1
1999	0.0	1342.0	672.0	224.0									1342.0
2000	0.0	195.4	844.0	312.7	204.4	93.3							844.0
2001	206.8	352.1	1162.4	912.3	107.8	45.9	28.1	9.0	5.0	0.7	0.6	1.5	1162.4
2002	1.5	459.7	1038.0	2345.8	83.6	29.7	14.5	4.8	3.1	2.8	0.2	0.6	2345.8
2003	29.2	344.0	293.9	29.8	8.0	3.0	2.7	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	344.0
2004	0.0	0.7	41.2	87.4	10.9	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	87.4
2005	0.0	0.0	244.3	101.5	6.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	244.3
2006	0.0	467.8	387.8	269.6	45.2	5.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	467.8
2007	0.0	0.0	134.0	40.7	4.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	134.0
2008	138.0	943.0	1381.2	1205.0	139.7	58.6	39.8	19.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1381.2
2009	458.9	773.5	981.2	192.5	82.1	21.1	10.1	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	981.2
2010	30.6	549.6	444.1	342.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	549.6
2011	0.0	209.9	6.3	180.3	29.4	5.3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	209.9
2012	59.5	1058.5	1109.6	520.2	97.2	39.0	22.3	8.3	2.2	0.0	0.0	0.0	1109.6
2013	19.3	30.7	409.9	42.9	13.3	20.8	3.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	409.9
2014	0.0	0.0	84.7	15.1	7.1	4.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	84.7
2015	0.0	0.0	495.4	326.4	38.9	23.2	6.2	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	495.4
2016	0.0	268.5	883.8	184.5	36.5	7.7	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	883.8
2017	19.7	874.2	1333.0	450.8	158.3	62.4	35.4	9.8	5.8	4.3	1.9	0.6	1333.0
2018	13.0	116.6	79.5	185.1	7.9	5.9	1.8	0.0					185.1
2019	0.0	1183.0	425.0	727.0	35.0	18.5	5.6						1183.0
MAX.	1160.0	1342.0	2831.1	2684.1	1270.0	660.0	100.0	34.0	15.0	13.4	7.0	390.0	2831.1
MED	75.5	302.4	537.3	349.0	90.4	31.8	9.8	3.4	0.9	0.6	0.3	16.3	1417.7
MIN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0

Fuente: PECHP,2019

**Anexo 8:** Análisis estadístico de serie de caudales máximos.

**Figura 9.** Serie de caudales máximos instantáneo estación puente Ñácara (1972 -2019).



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 3** Caudales máximos instantáneos para distintos periodos de retorno.

Periodo de retorno T (Años)	Distribución de la caudales máximos instantáneos						
	Probabilidad de Excedencia	Gumbel	Normal	Log Normal 2P	Log Normal 3P	Gamma 2P	Gamma 3P
200	0.995	2663.0	2035.9	7229.2	4170.9	3120.0	2889.4
100	0.99	2354.6	1894.0	5379.2	3353.3	2603.9	2537.7
50	0.98	2045.0	1739.0	3894.4	2638.7	2220.4	2181.8
25	0.96	1733.0	1567.0	2719.3	2017.6	1835.5	1821.7
10	0.9	1312.7	1300.0	1559.3	1324.4	1324.4	1336.7

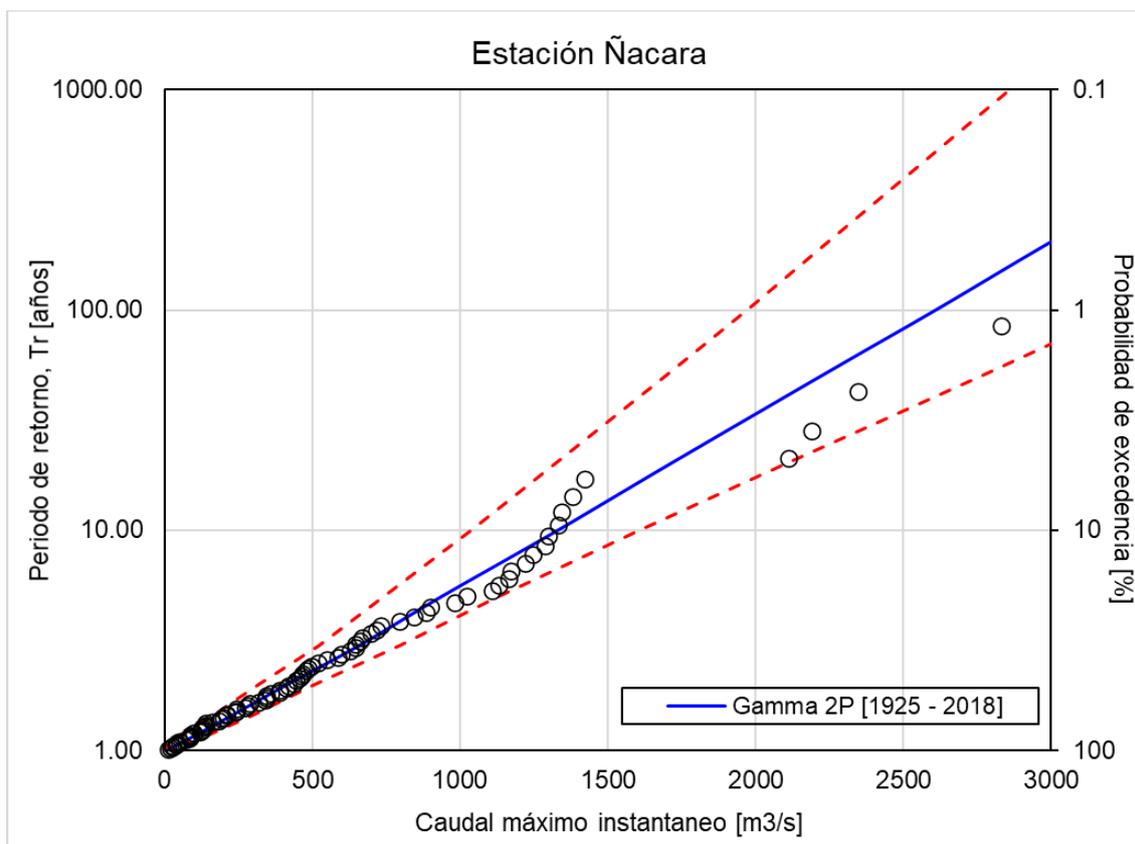
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 4** Prueba de bondad de Ajuste.

#	Distribución	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-cuadrado	
		Estadística	Rango	Estadística	Rango	Estadística	Rango
1	<b>Gamma 2P</b>	<b>0.08064</b>	<b>1</b>	<b>1.6799</b>	<b>2</b>	<b>2.0451</b>	<b>1</b>
2	Lognormal	0.10062	2	4.5278	5	2.8337	3
3	Weibull	0.10062	3	3.9396	4	3.1087	4
4	Gumbel	0.1164	4	0.78587	1	2.4673	2
5	Normal	0.19345	5	3.7568	3	3.4849	5
6	Log-Gama	No hay ajuste					
7	Log-Pearson III	No hay ajuste					

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 10.** Probabilidad de excedencia [%] puente Ñacara (1972 -2018) – Gamma 2P.



**Fuente:** Elaboración propia.

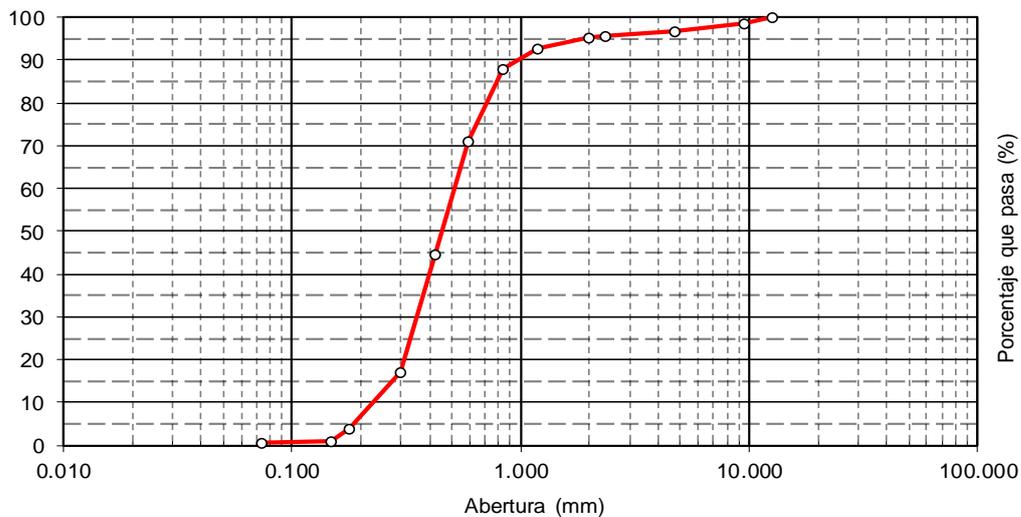
## Anexo 9: Curva granulométrica – Puente Ñacara.

### ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (NORMA NTP 339.128)

DATOS DEL ENSAYO	
CALICATA	: 01
MUESTRA	: M-01
PROF. (m)	: 0.00-2.00

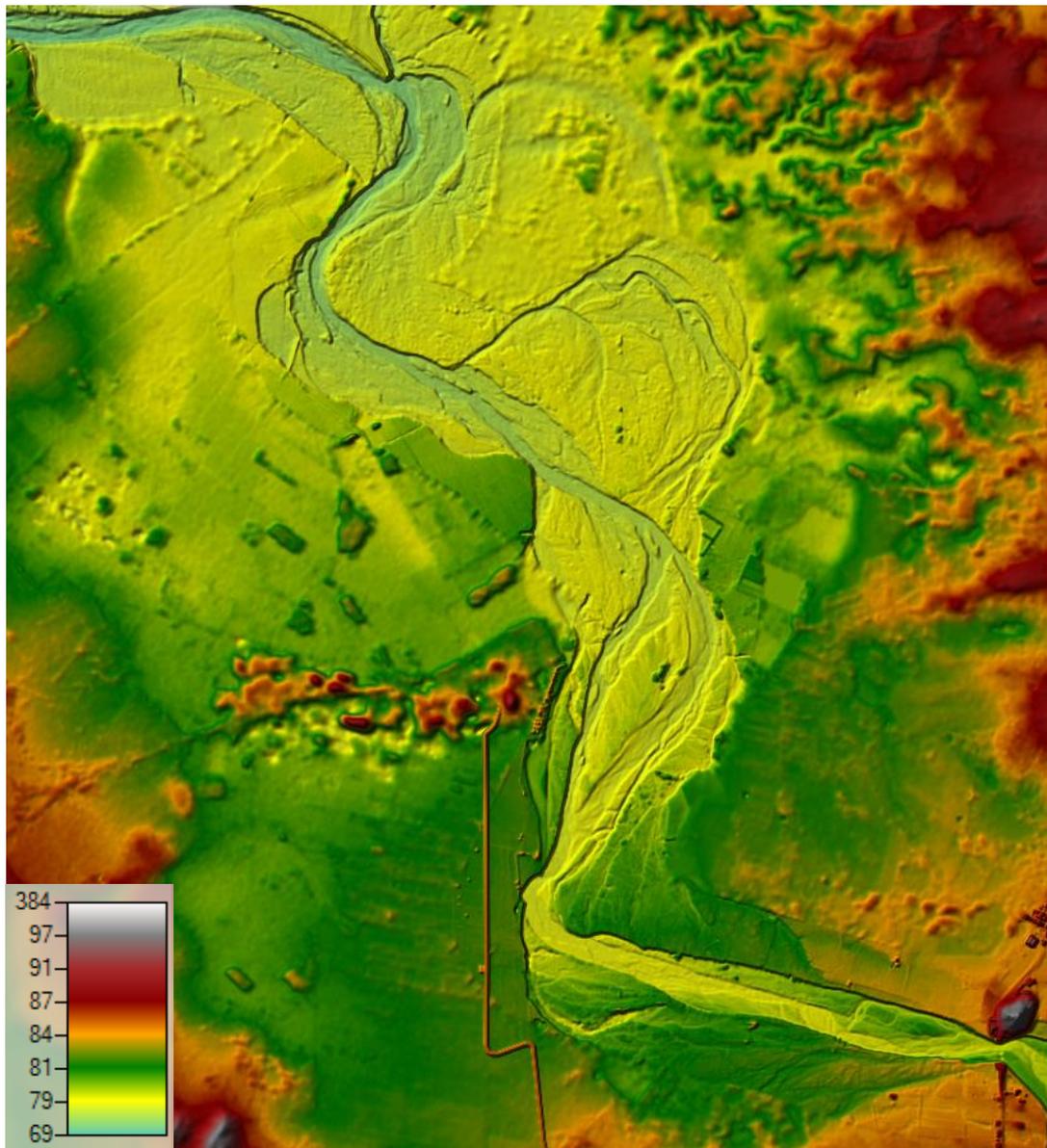
DATOS DE ENSAYO				
TAMIZ	ABERT. mm.	%RET. A.C.	% Q' PASA	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
4 1/2"	114.300			
4"	101.600			
3 1/2"	88.900			
3"	76.200			
2 1/2"	63.500			
2"	50.800			LÍMITE LÍQUIDO = NP
1 1/2"	38.100			LÍMITE PLÁSTICO = NP
1"	25.400			ÍNDICE PLÁSTICO = NP
3/4"	19.100			CLASF. AASHTO =
1/2"	12.700		100.0	CLASF. SUCS = <b>SP</b>
3/8"	9.520	1.4	98.6	
# 4	4.760	2.0	96.6	
# 8	2.360	1.1	95.5	
# 10	2.000	0.4	95.1	
# 16	1.190	2.2	92.9	
# 20	0.840	5.0	87.9	
# 30	0.590	16.9	71.0	
# 40	0.420	26.3	44.8	CONT. DE HUMEDAD = 9.8 %
# 50	0.300	27.5	17.3	
# 80	0.177	13.3	3.9	
# 100	0.149	2.9	1.1	
# 200	0.074	0.6	0.5	
< # 200	FONDO	0.5	0.0	
		Coef. Uniformidad		Índice de Consistencia
		Coef. Curvatura		
Descripción suelo:		Pot. de expansión		

### CURVA GRANULOMÉTRICA



Fuente: ANA (2014).

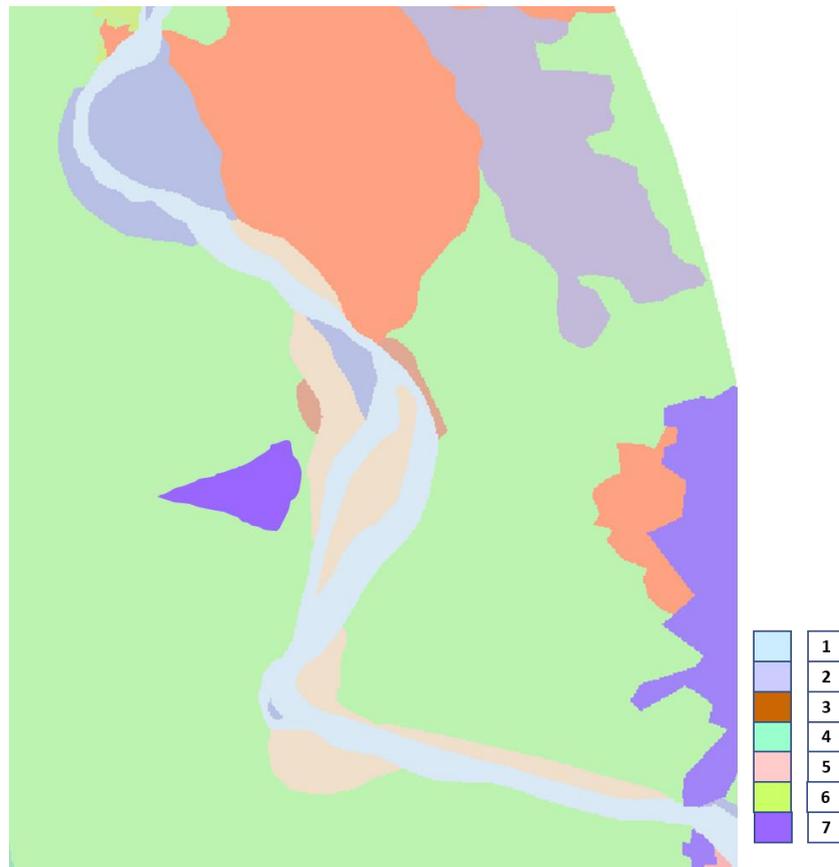
**Anexo 10:** Modelo Digital de Elevaciones y mapa de rugosidades– Sector La Encantada



**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 11: Rugosidad de Manning – Sector La Encantada**

**Figura 11.** Mapa de la variación espacial del coeficiente de rugosidad de Manning.



Fuente: Elaboración propia.

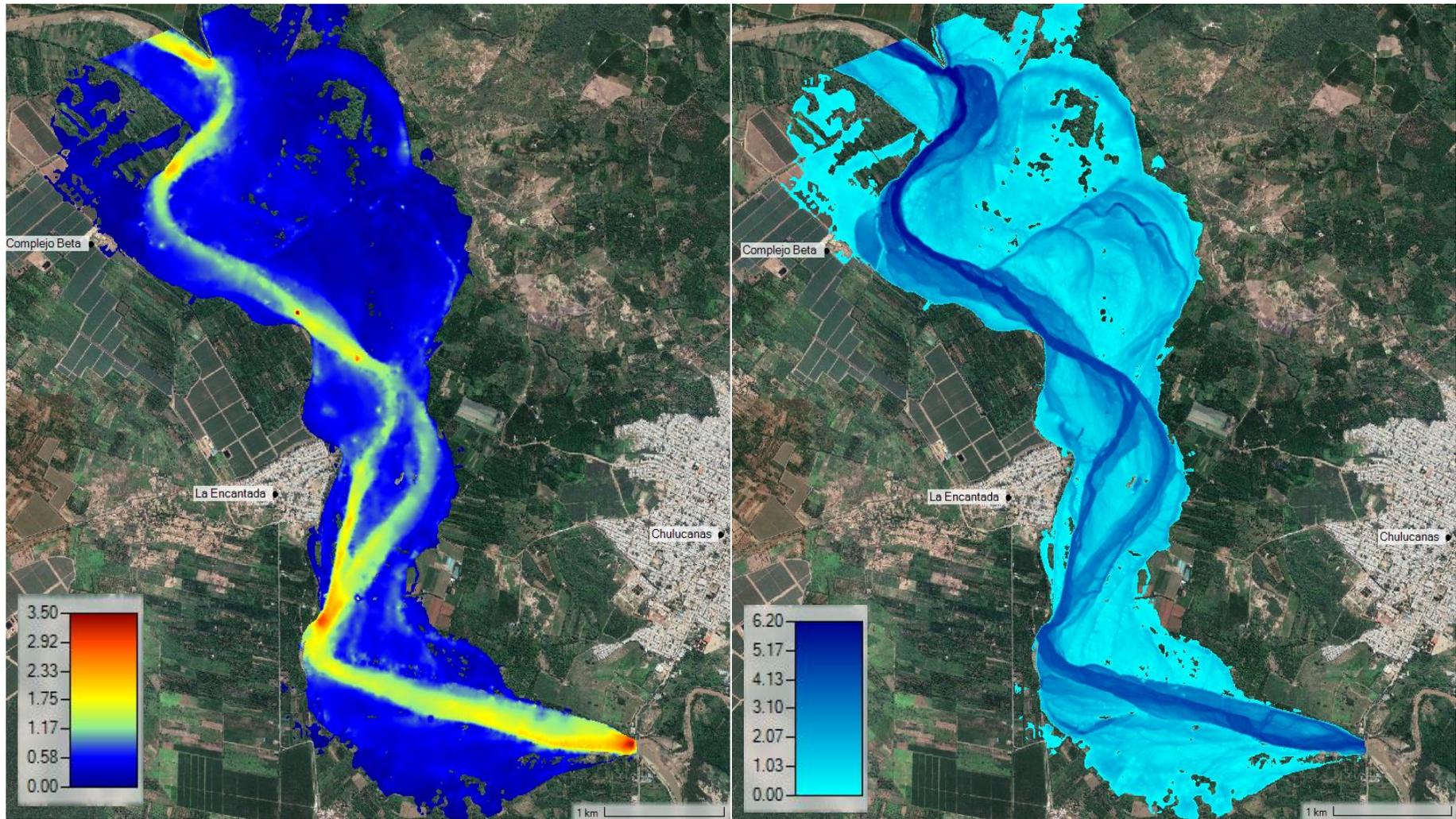
**Tabla 5** Coeficientes de rugosidad de Manning del río Piura- sector La Encantada

ID	Descripción	Coeficientes de Rugosidad $n$ (s/m <sup>1/3</sup> )
	<b>a) Cauce Principal</b>	-
1	Cauce natural con áreas de pastos, hierbas y arbustos crecidos.	0.035
	<b>b) Márgenes del cauce y zonas de inundación.</b>	-
2	Áreas de pastos y hierbas densos	0.040
3	Áreas de pastos y hierbas semi densos	0.035
4	Áreas de cultivos	0.035
5	Zona arbustos y malezas escasos	0.045
6	Zona de mediana a alta densidad de arbustos	0.060
	<b>c) Poblaciones</b>	-
7	Zonas urbanas	0.100

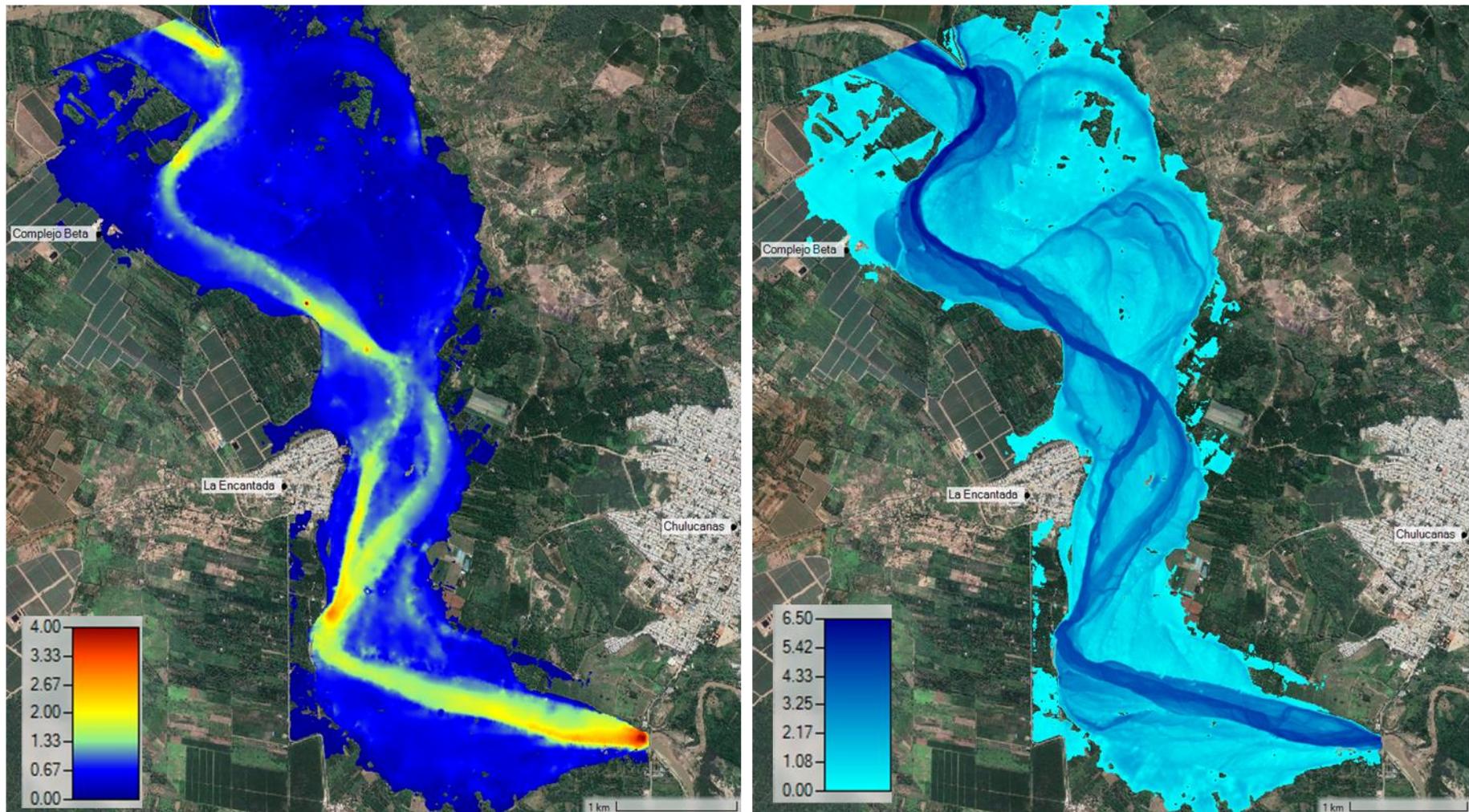
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 12: Mapas de inundación y secciones transversales para diferentes periodos de retorno

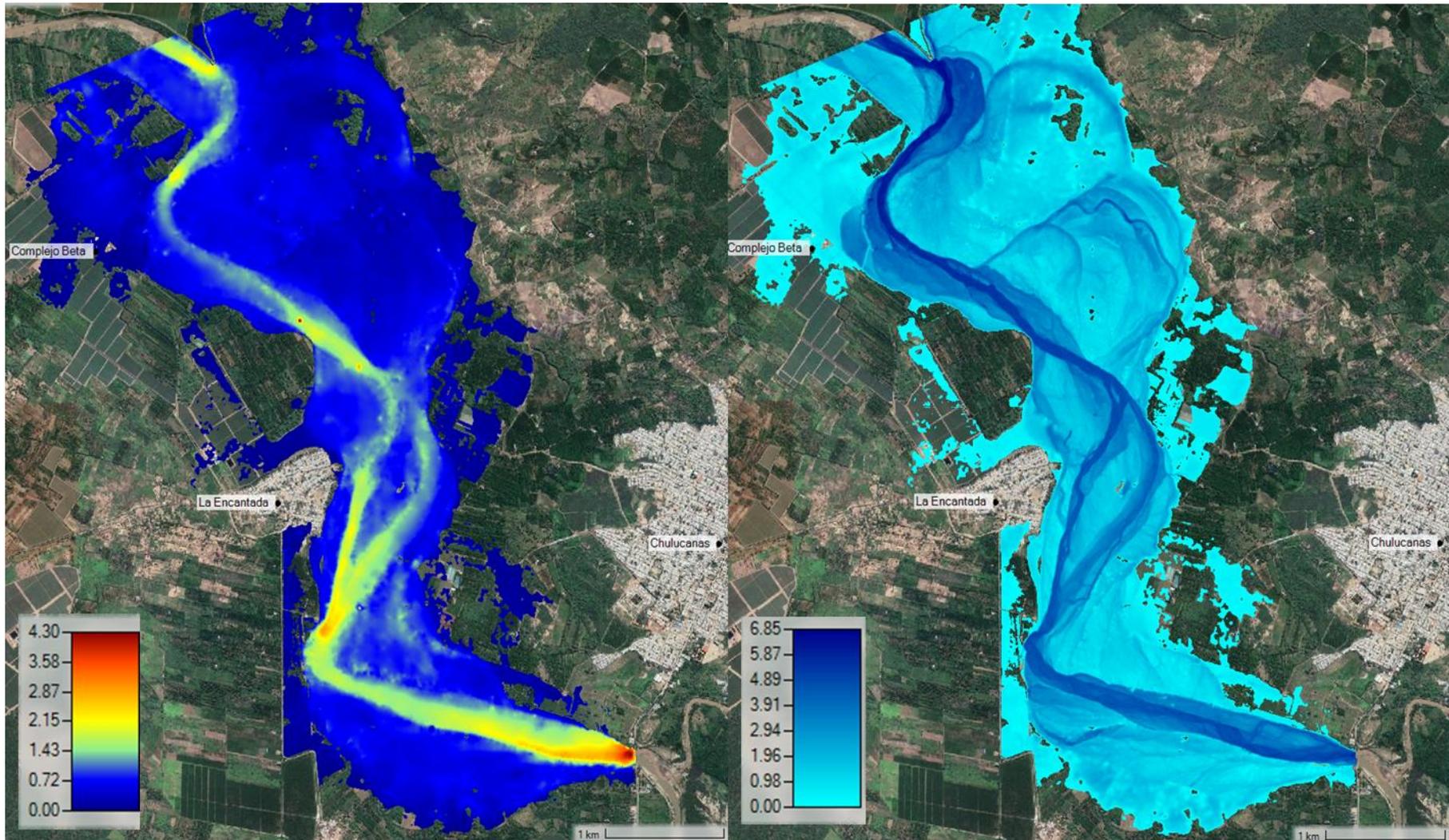
Figura 12: Mapa de tirantes hidráulicos y velocidades en el río Piura – Sector La Encantada (Tr = 10 años).



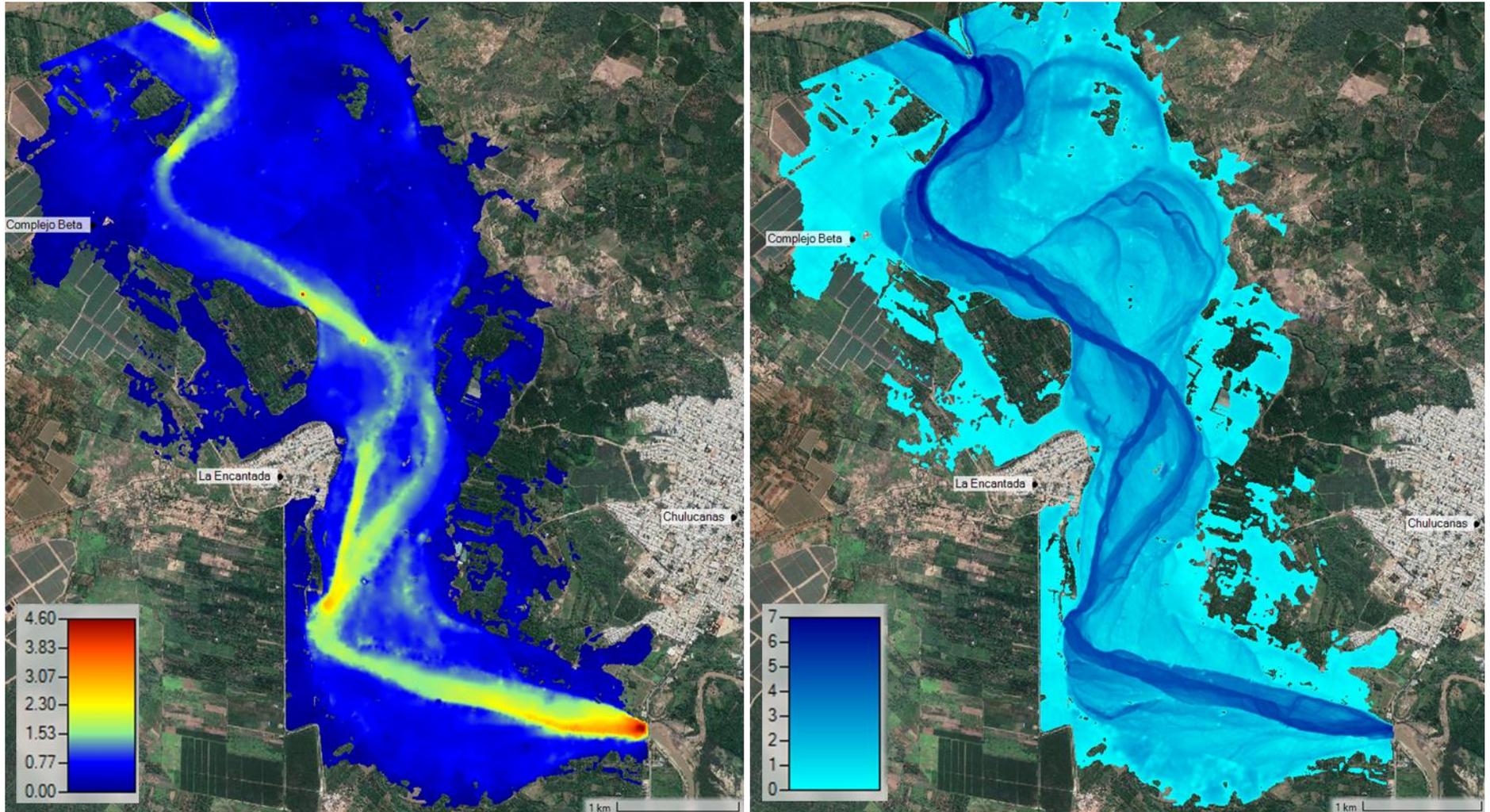
**Figura 13.** Mapa de tirantes hidráulicos y velocidades en el río Piura – Sector La Encantada ( $T_r = 25$  años).



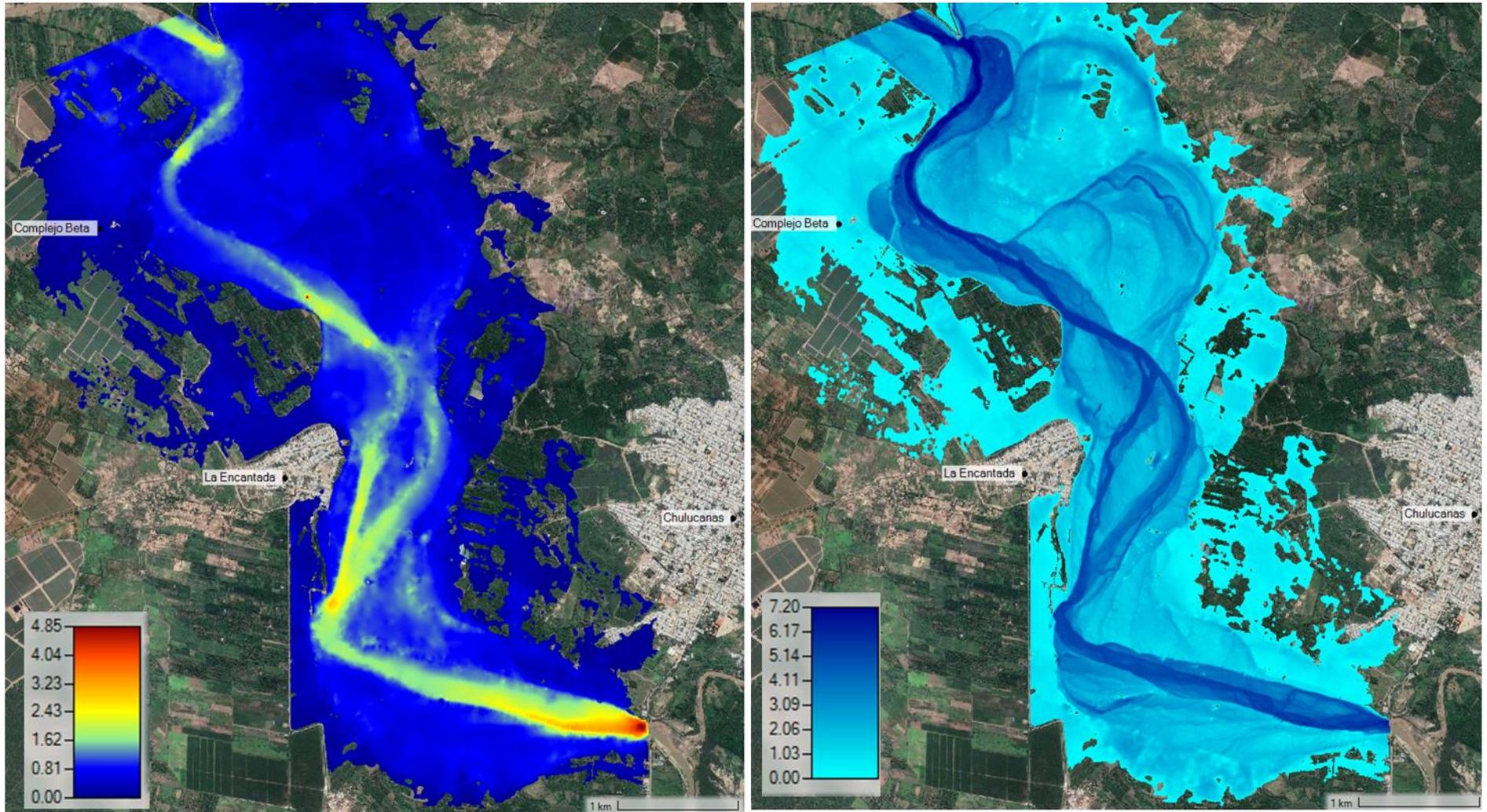
**Figura 14** Mapa de tirantes hidráulicos y velocidades en el río Piura – Sector La Encantada ( $T_r = 50$  años).



**Figura 15:** Mapa de tirantes hidráulicos y velocidades en el río Piura – Sector La Encantada ( $T_r = 100$  años).

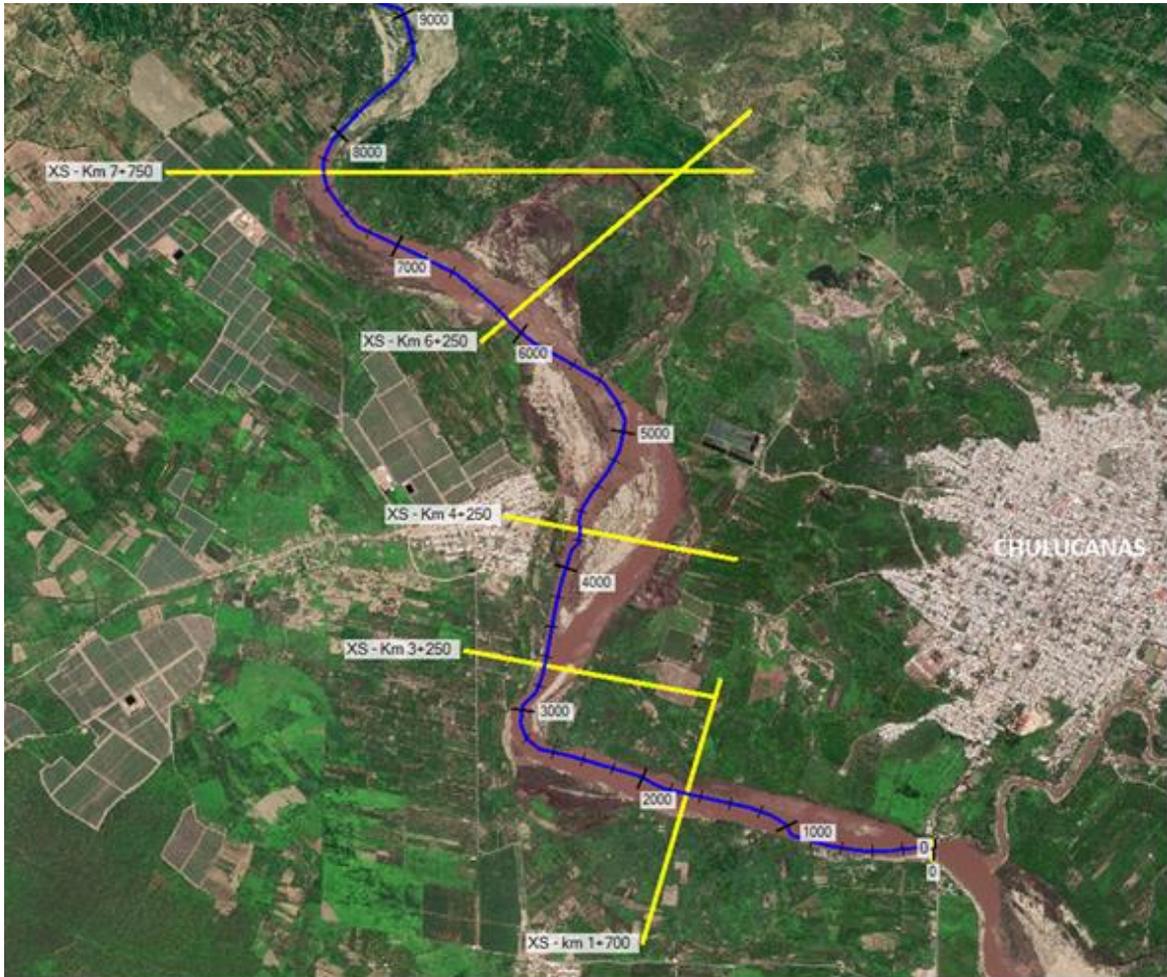


**Figura 16.** Mapa de tirantes hidráulicos y velocidades en el río Piura – Sector La Encantada ( $Tr = 200$  años).



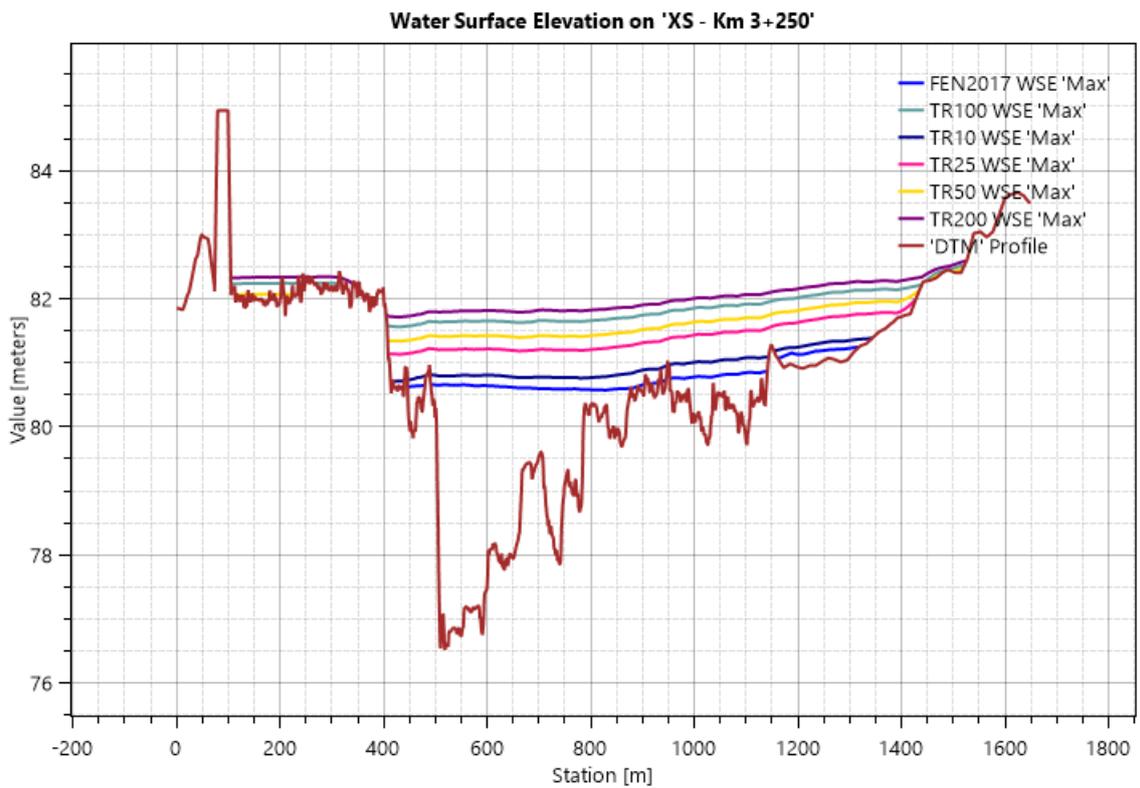
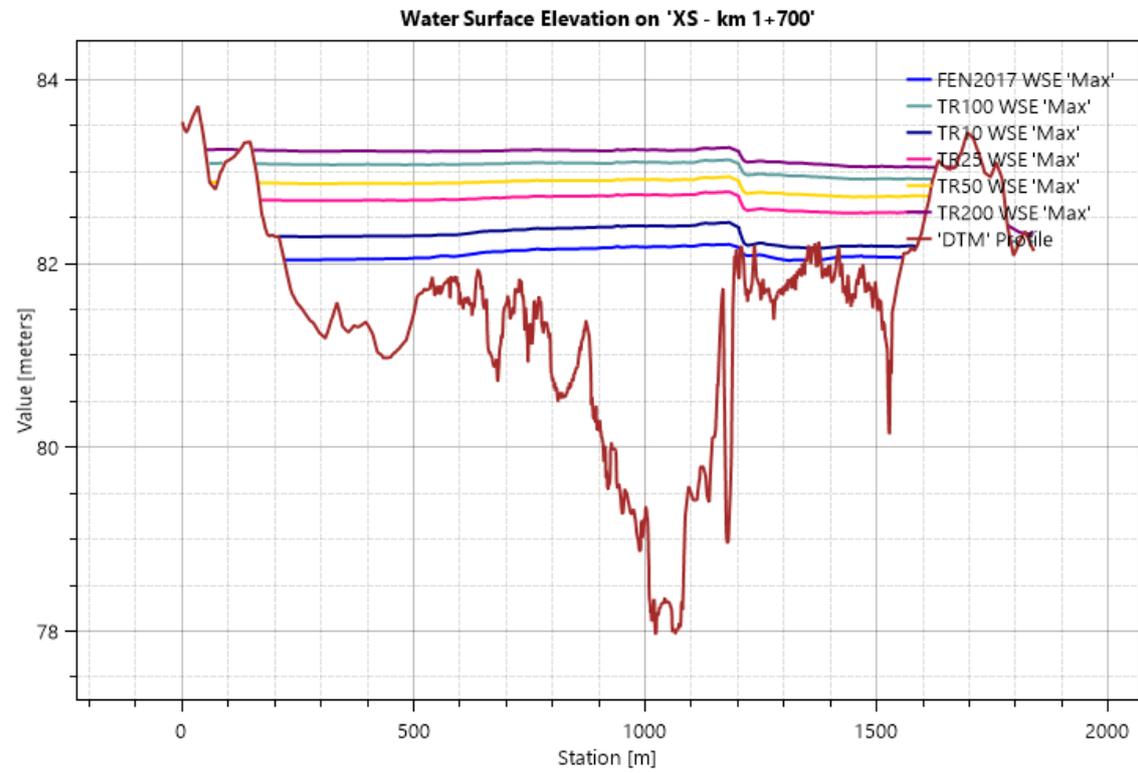
**Anexo 13:** Niveles de lámina de agua para diferentes periodos de recurrencia – Sector La Encantada.

**Figura 17.** Ubicación secciones transversales – Sector La Encantada.



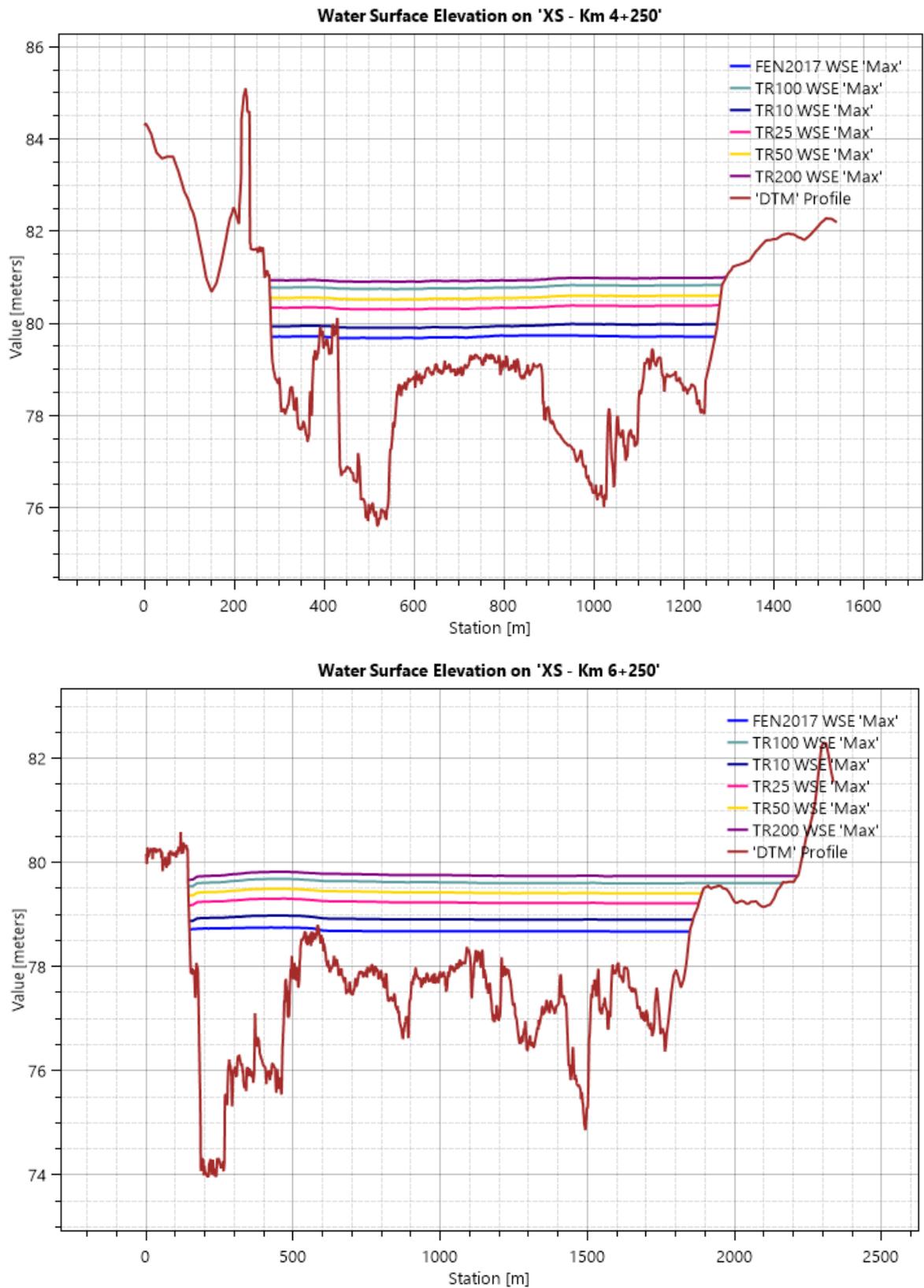
**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 18** Secciones transversales río Piura km 1+700 y 3+250 – Sector La Encantada.



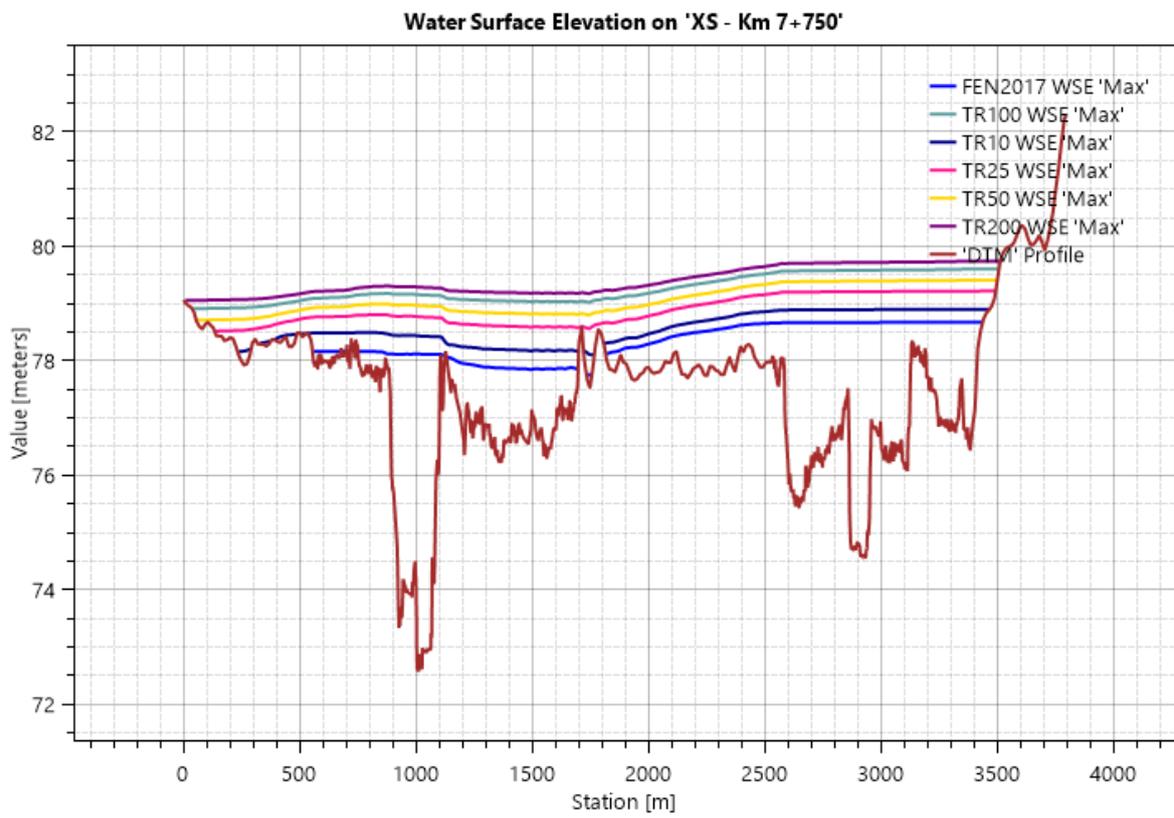
**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 19** Secciones transversales río Piura km 4+250 y 6+250– Sector La Encantada.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 20.** Secciones transversales río Piura km 7+750– Sector La Encantada.



**Fuente:** Elaboración propia.