

INFORME TÉCNICO: Estimación de Umbrales de Inundación en las cuencas del Chira y Piura



Dirección de Hidrología
Subdirección de Predicción Hidrológica

Diciembre 2023

INFORME TÉCNICO:

**Estimación de umbrales de Inundación
en las cuencas del Chira y Piura**



INFORME TÉCNICO:

Estimación de umbrales de Inundación en las cuencas del Chira y Piura

Presidente Ejecutivo

MSc. Gabriela Teófila Rosas Benancio

Director de Hidrología

MSc. Oscar Gustavo Felipe Obando

Subdirectora de Predicción Hidrológica

MSc. Karen Beatriz León Altuna

Autor:

Ing. James Dean Vidal Moreno
Subdirección de Predicción Hidrológica

Derechos Reservados

© SENAMHI, Diciembre 2023

Citar como:

Vidal, J. (2023), Informe Técnico: Estimación de Umbrales de Inundación en las cuencas del Chira y Piura. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI.

CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN.....	9
II.	OBJETIVOS	10
III.	MATERIALES Y METODOLOGÍA	11
3.1.	Materiales y equipos.....	11
3.1.1.	Descripción de la zona de estudio	11
3.1.2.	Información hidrológica.....	12
3.1.3.	Equipos de topografía e hidrometría	12
3.2.	Metodología.....	14
3.2.1.	Análisis hidrológico	14
3.2.2.	Análisis satelital	16
3.2.3.	Análisis topográfico.....	16
3.2.4.	Umbrales críticos de inundación	18
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
4.1.	Estación hidrológica EHA PUENTE ÑÁCARA	24
4.2.	Estación hidrológica EHA SAN PEDRO.....	27
4.3.	Estación hidrológica EHA HACIENDA BARRIOS	30
4.4.	Estación hidrológica EHA SALITRAL.....	32
4.5.	Estación hidrológica EHA TAMBOGRANDE.....	35
4.6.	Estación hidrológica EHA LAGARTERA	38
4.7.	Estación hidrológica EHA SÁNCHEZ CERRO	40
4.8.	Estación hidrológica EHA BOCATOMA CHIPILLICO.....	43
V.	CONCLUSIONES.....	46
VI.	RECOMENDACIONES.....	47
VII.	BIBLIOGRAFÍA.....	48
VIII.	PANEL FOTOGRÁFICO.....	49

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de las estaciones hidrológicas para la estimación de los umbrales de inundación del Chira y Piura, ámbito de la Dirección Zonal 1.....	11
Figura 2. Flujograma para la estimación de los umbrales de inundación en el ámbito de la DZ1	14
Figura 3. Sección esquemática transversal que muestra los umbrales de altura y los tipos de flujo que discurren por el cauce de análisis	20
Figura 4. Estimación del umbral amarillo considerando una sección típica del cauce en la región norte.....	22
Figura 5. Estimación del umbral naranja considerando una sección típica del cauce en la región norte.....	23
Figura 6. Estimación del umbral rojo considerando una sección típica del cauce en la región norte	24
Figura 7. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Puente Ñácara. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo	25
Figura 8. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Puente Ñácara. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo.	25
Figura 9. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en Puente Ñácara.....	26
Figura 10. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Puente Ñácara.....	26
Figura 11. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Puente Ñácara.....	27
Figura 12. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA San Pedro. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarilloa	27
Figura 13. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA San Pedro. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo	27
Figura 14. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA San Pedro. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo	28
Figura 15. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en San Pedro.....	28
Figura 16. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA San Pedro	29
Figura 17. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA San Pedro.....	29
Figura 18. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Hda. Barrios. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo	30
Figura 19. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Hda. Barrios. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo	31
Figura 20. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en Hda. Barrios.....	31

Figura 21. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Hda. Barrios.....	32
Figura 22. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Hda. Barrios.....	32
Figura 23. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Salitral. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo.....	33
Figura 24. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Salitral. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo.....	33
Figura 25. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en Salitral.....	34
Figura 26. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Salitral.....	34
Figura 27. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Salitral.....	35
Figura 28. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Tambogrande. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo.....	35
Figura 29. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Tambogrande. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo.....	36
Figura 30. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en Tambogrande.....	37
Figura 31. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Tambogrande.....	37
Figura 32. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Tambogrande.....	37
Figura 33. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Lagartera. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo.....	38
Figura 34. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Lagartera. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo.....	39
Figura 35. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en Lagartera.....	39
Figura 36. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Lagartera.....	40
Figura 37. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Lagartera.....	40
Figura 38. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Sánchez Cerro. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo.....	41
Figura 39. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Sánchez Cerro. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo.....	41
Figura 40. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en Sánchez Cerro.....	42
Figura 41. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Sánchez Cerro.....	42
Figura 42. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Sánchez Cerro.....	43

Figura 43. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Bocatoma Chipillico. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo... 43

Figura 44. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Bocatoma Chipillico. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo..... 44

Figura 45. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en Bocatoma Chipillico 45

Figura 46. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Bocatoma Chipillico 45

Figura 47. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Bocatoma Chipillico .. 45

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones hidrológicas de análisis donde se estimarán los umbrales hidrológicos de inundación 12

Tabla 2. Umbrales de inundación en sus tres niveles de rojo, naranja y amarillo 18

Tabla 3. Estimación de los umbrales de alerta en función al nivel máximo de agua en la sección de análisis 21

Tabla 4. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Puente Ñácara 26

Tabla 5. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA San Pedro 29

Tabla 6. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Hda Barrios 30

Tabla 7. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Salitral 34

Tabla 8. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Tambogrande 36

Tabla 9. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Lagartera 38

Tabla 10. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Sánchez Cerro 42

Tabla 11. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Bocatoma Chipillico .. 44

ESTIMACIÓN DE UMBRALES DE INUNDACIÓN EN LAS CUENCAS DEL CHIRA y PIURA

I. INTRODUCCIÓN

La estimación de umbrales de inundación es un componente esencial en la gestión de riesgos relacionados con eventos extremos de inundación. Este proceso implica la identificación y evaluación de los niveles críticos de agua que, una vez alcanzados, pueden resultar en inundaciones significativas. La comprensión precisa de estos umbrales es crucial para tomar decisiones informadas en la planificación urbana, la gestión del agua y la preparación para eventos climáticos extremos.

En la actualidad, el cambio climático y la urbanización acelerada han intensificado la necesidad de desarrollar metodologías robustas para estimar los umbrales de inundación. Los científicos e ingenieros hidráulicos utilizan modelos matemáticos avanzados y tecnologías de teledetección para evaluar la topografía del terreno, los patrones climáticos y otros factores que influyen en la inundación. La información recopilada se utiliza para prever posibles escenarios de inundación y definir umbrales que indiquen niveles críticos de riesgo.

La gestión efectiva de los umbrales de inundación no solo implica la predicción precisa, sino también la comunicación eficaz de estos riesgos a las comunidades afectadas. Las autoridades gubernamentales y los organismos de respuesta a emergencias desempeñan un papel vital al traducir la información técnica en alertas comprensibles y acciones preventivas.

En el contexto del Fenómeno de El Niño 2023-2024, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) ha desarrollado trabajos de campo como el levantamiento de información topográfica e hidrométrica durante los meses de setiembre, octubre y noviembre del año 2023 en la cuenca de los ríos Chira y Piura, con fines de la identificación y evaluación de umbrales de inundación.

En ese sentido se revisan métodos de estimación de umbrales de inundación, considerando datos históricos, modelos hidrológicos y avances tecnológicos como es el uso de equipos geodésicos tipo GNSS que permitan una evaluación más precisa, robusta y oportuna. Para finalmente, proponer una metodología para la estimación de umbrales de inundación en las cuencas de los ríos Chira y Piura, debido a su alta importancia en la gestión de riesgos y desastres.

II. OBJETIVOS

- Proponer una metodología para establecer de umbrales de inundación en los puntos de monitoreo hidrológico en la cuenca de los ríos Chira y Piura.
- Estimar y/o actualizar de umbrales de inundación de nivel amarillo, naranja y rojo en los puntos de monitoreo hidrológico en la cuenca de los ríos Chira y Piura.
- Validar los umbrales propuestos frente a lugares expuestos o propensos de desborde y/o afectación frente a crecidas durante la temporada de avenidas.

III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. Materiales y equipos

3.1.1. Descripción de la zona de estudio

La cuenca Piura, ubicada en la costa noroeste del país, se caracteriza por la presencia del río Piura, principal curso de agua que la atraviesa. Este río es vital para el abastecimiento de agua para la agricultura y otras actividades en la región, la cuenca hidrográfica también puede incluir afluentes y subcuencas que contribuyen al sistema fluvial en la zona. La topografía de la cuenca de Piura es diversa, con áreas que van desde llanuras costeras hasta zonas más montañosas. La cuenca puede incluir áreas de la Cordillera de los Andes, así como regiones más bajas y planas hacia la costa, la topografía influye en la distribución de los recursos hídricos y en la capacidad de retención de agua en la cuenca. La región tiene un clima predominantemente árido y semiárido, típico de la costa norte del Perú. La temperatura puede variar dependiendo de la altitud y la proximidad al océano. La cuenca puede experimentar estaciones secas y húmedas, con la temporada de lluvias generalmente concentrada entre los meses de diciembre y abril. Las lluvias son cruciales para la recarga de los recursos hídricos en la cuenca.

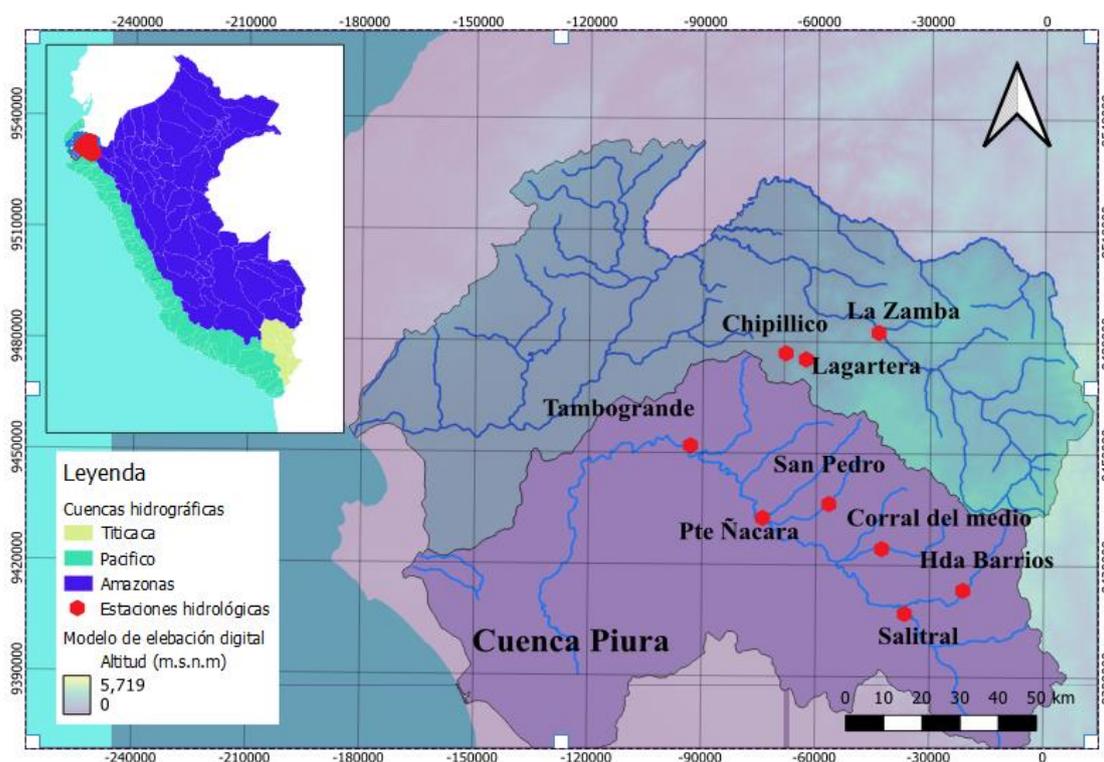


Figura 1. Ubicación geográfica de las estaciones hidrológicas para la estimación de los umbrales de inundación del Chira y Piura, ámbito de la Dirección Zonal 1

Fuente: Elaboración Propia

3.1.2. Información hidrológica

Respecto a la información hidrológica los puntos considerados fueron las estaciones hidrológicas de acuerdo a la Tabla 1; la Figura 1, muestra la ubicación espacial de las estaciones de monitoreo hidrológico en el ámbito de la Dirección Zonal 1.

Tabla 1. Estaciones hidrológicas de análisis donde se estimarán los umbrales hidrológicos de inundación

Estación hidrológica	Río	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m)
Tambogrande	Piura	-4.93	-80.34	65
Puente Ñácara	Piura	-5.11	-80.17	96
San Pedro	Charanal	-5.07	-80.01	427
Corral del Medio	Corral del Medio	-5.18	-79.89	439
Hacienda Barrios	Bigote	-5.28	-79.69	527
Salitral	Piura	-5.34	-79.83	171
Bocatoma Chippillico	Chippillico	-4.71	-80.11	373
Lagartera	Chippillico	-4.72	-80.06	760
Bocatoma La Zamba	Quiroz	-4.66	-79.89	792

Fuente: Senamhi

Este trabajo se desarrolló en los meses de setiembre, octubre y noviembre del 2023, para lo cual se realizó una recopilación de datos procedentes de diversas fuentes. Estas fuentes incluyeron registros hidrológicos, datos topográficos y observaciones de campo. Los registros hidrológicos, esenciales para comprender los patrones de flujo de agua y los niveles de ríos, se obtuvieron de la sólida base de datos de niveles y caudales gestionada por la Dirección de Hidrología del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Los datos topográficos, cruciales para la caracterización detallada de la topografía y morfología del terreno en las áreas de estudio, se recolectaron mediante campañas de levamiento topográfico llevadas a cabo en las cuencas de intervención. Este proceso permitió obtener una descripción detallada de la geografía local y proporcionó datos clave para el análisis hidrológico y la modelización de eventos extremos. El esfuerzo conjunto de estas fuentes de datos proporcionó una base sólida y completa para la investigación, permitiendo un enfoque riguroso en la evaluación de eventos hidrológicos extremos y sus efectos en las zonas de estudio.

3.1.3. Equipos de topografía e hidrometría

La realización de trabajos topográficos utilizando equipos GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) y correntómetros para hidrometría y topografía implica la aplicación de tecnologías avanzadas para obtener mediciones precisas y eficientes en el campo. Además, el uso de puntos de orden “C” es esencial para establecer una red de control geodésico que garantice la exactitud y la coherencia de los datos recopilados. A continuación, se describe el proceso y la importancia de estos elementos en el contexto de trabajos topográficos:

- **Equipos GNSS (Global Navigation Satellite System)**

Los equipos GNSS, como receptores GPS (Global Positioning System), GLONASS (Global Navigation Satellite System), o sistemas combinados, permiten la determinación precisa de coordenadas geográficas en el terreno. La tecnología GNSS utiliza señales de satélites para calcular la posición en tiempo real, lo que proporciona una base sólida para los levantamientos topográficos.

- **Equipos de Hidrometría**

Los correntómetros se utilizan para medir la velocidad de las corrientes de agua. Estos instrumentos son cruciales en proyectos hidrométricos para comprender los flujos y volúmenes de agua en ríos, arroyos o canales. La combinación de datos hidrométricos con información topográfica permite realizar análisis hidráulicos detallados y modelar el comportamiento del agua en diferentes condiciones, el uso del correntómetro estará sujeto a las condiciones del flujo como es velocidad, tirante y condiciones favorables para realizar el trabajo de aforo, caso contrario será el uso del ADCP conjuntamente con un bote.

- **Puntos de Orden “C”**

Los puntos de orden C son puntos geodésicos de referencia de alta precisión utilizados para establecer una red de control geodésico local. Estos puntos son fundamentales para garantizar la coherencia y la precisión de las mediciones topográficas. La red de control geodésico proporciona una base geodésica común para todas las mediciones en el área de estudio. Esto es esencial para la integración de datos topográficos y la creación de mapas precisos.

- **Planificación del Trabajo**

Antes de iniciar el trabajo de campo, se realiza una planificación detallada que incluye la identificación de puntos de orden C existentes y la ubicación estratégica de estaciones GNSS. Se establece una red de control geodésico que abarque el área de interés, utilizando los puntos de orden C como referencia. En el campo, se colocan estaciones GNSS en ubicaciones planificadas para recopilar datos de coordenadas precisos. Los correntómetros se utilizan para medir las velocidades de corriente en diferentes puntos a lo largo de las vías fluviales.

Los datos GNSS y de correntómetros se integran para crear un conjunto completo de información topográfica e hidrométrica. La información se procesa y ajusta utilizando software especializado para garantizar la coherencia y la precisión. Con los datos integrados, se generan mapas topográficos detallados, perfiles de ríos y otros productos relevantes para el proyecto. La información resultante se utiliza para análisis hidráulicos, diseño de infraestructuras, y toma de decisiones en proyectos relacionados con recursos hídricos.

3.2. Metodología

A continuación, se presenta la metodología empleada para el cumplimiento de los objetivos en la estimación de los umbrales de inundación. La Figura 2 se menciona cada uno de los pasos seguidos en la determinación, actualización y validación de los umbrales.

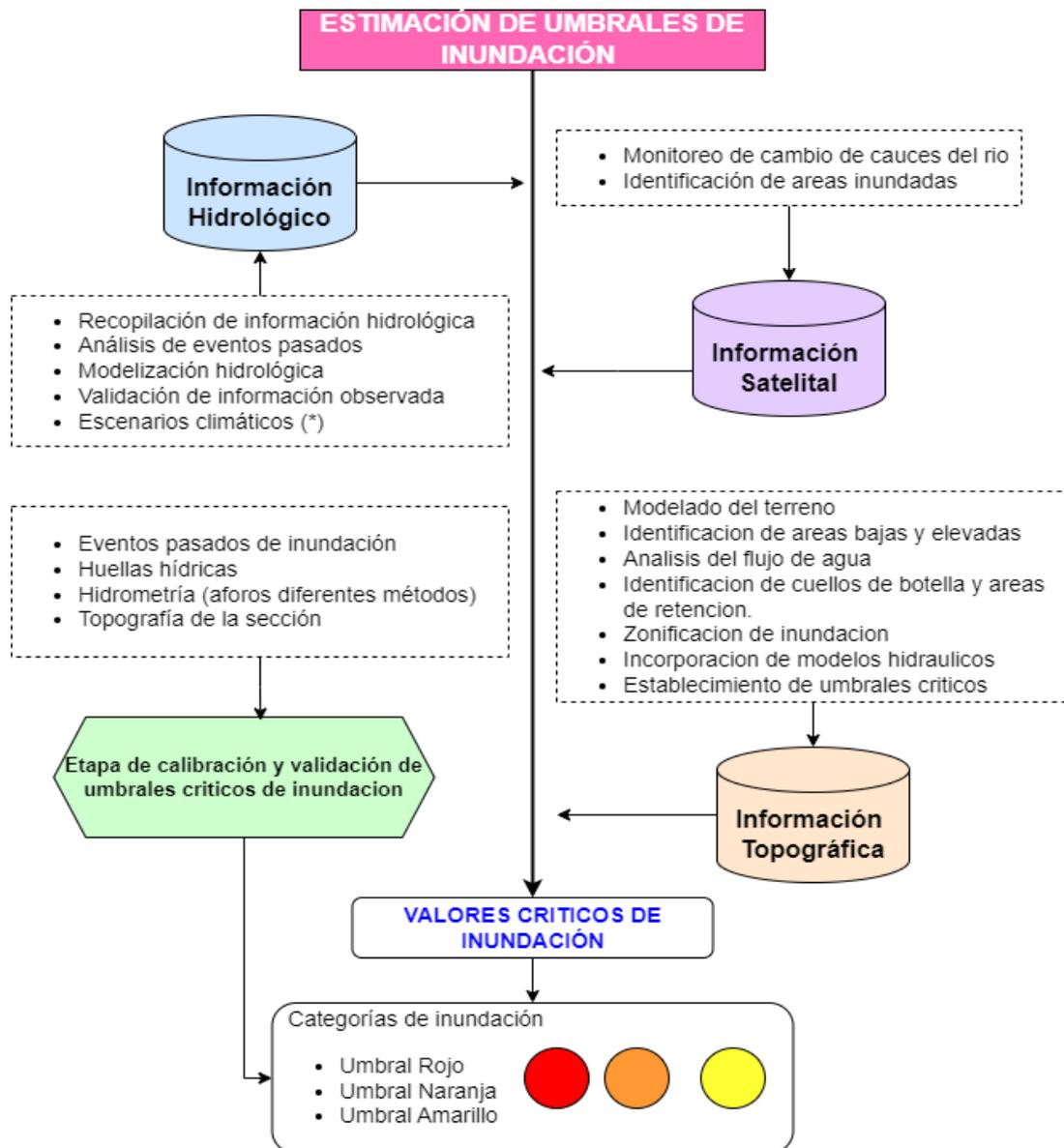


Figura 2. Flujograma para la estimación de los umbrales de inundación en el ámbito de la DZ1
Fuente: Elaboración propia

3.2.1. Análisis hidrológico

La recopilación de información hidrológica desempeña un papel fundamental en la estimación de umbrales de inundación, ya que proporciona los datos necesarios para comprender los patrones de flujo del agua y prever posibles eventos extremos. A

continuación, se presenta una metodología general para la recopilación de información hidrológica en el contexto de la estimación de umbrales de inundación:

- **Recopilación de información histórica**

Se inicia con la recopilación de datos históricos de caudales y niveles de agua en la región de interés. Estos datos pueden provenir de estaciones meteorológicas, estaciones hidrológicas y otros puntos de monitoreo relevantes, en nuestro caso de estudio serían las estaciones hidrológicas de monitoreo.

- **Análisis de eventos pasados**

Se lleva a cabo un análisis detallado de eventos pasados de inundación. Esto implica estudiar las condiciones meteorológicas, patrones de precipitación, y otros factores que contribuyeron a eventos de inundación previos.

- **Modelización hidrológica**

Utilizando modelos hidrológicos, se simula el comportamiento de la cuenca hidrográfica. Estos modelos consideran la topografía, la capacidad de retención del suelo, las características de la vegetación y otros parámetros para prever la respuesta hidrológica ante diferentes escenarios climáticos.

- **Validación de datos observados**

Los resultados del modelo se validan utilizando datos observados de eventos pasados. Esto ayuda a ajustar y mejorar la precisión del modelo hidrológico, asegurando su capacidad para reflejar fielmente las condiciones del mundo real.

- **Escenarios climáticos**

De ser el caso se consideran diferentes escenarios climáticos, incluyendo eventos de lluvia intensa, deshielo, y otras condiciones climáticas extremas que podrían afectar el sistema hidrológico. La modelización se realiza para estos escenarios con el fin de identificar posibles umbrales de inundación, para los puntos de monitoreo no se están considerando escenarios climáticos toda vez que se estiman los umbrales en base a observación in situ de eventos pasados ocurridos.

- **Umbrales de inundación**

Se establecen sistemas de alerta temprana basados en los umbrales identificados. Estos sistemas integran la información hidrológica recopilada con datos meteorológicos en tiempo real para proporcionar alertas precisas y oportunas ante la posibilidad de inundaciones.

- **Comunicación de los riesgos de inundación**

La información hidrológica recopilada y los umbrales identificados se comunican de manera efectiva a las autoridades locales, comunidades, etc. Esto facilita una respuesta rápida y coordinada en caso de amenaza de inundación.

3.2.2. Análisis satelital

Es importante resaltar y considerar que la información satelital es una herramienta importante para poder tener una idea en puntos de control nuevos y conocidos, debido a que estas permitirán tener una idea de eventos pasados, cambios de sección, hidrodinámica del río, etc. Permitiendo tener un mayor alcance para los trabajos en campo y las validaciones en eventos extremos, entre otros tales como:

- **Monitoreo de cambios de cauce en el río**

Google Earth proporciona imágenes satelitales actualizadas que permiten realizar un seguimiento de los cambios en el cauce de ríos y cuerpos de agua a lo largo del tiempo. Utilizando la función de vista de satélite y comparando con imágenes históricas para detectar modificaciones en los cauces.

- **Identificación de áreas inundadas**

Durante eventos de lluvias intensas o inundaciones, se pueden utilizar esta herramienta para visualizar las áreas afectadas. Observando las imágenes satelitales recientes y compáralas con imágenes anteriores para identificar zonas inundadas y evaluar la magnitud del impacto, mediante modelos hidrológicos, hidráulicos, estudios topográficos, entre otros.

Los eventos hidrológicos pueden tener un impacto en la erosión costera y cambios en la línea de costa. Google Earth permite la observación de estas transformaciones a lo largo del tiempo, lo que es útil para estudios a largo plazo y temas relacionados a determinación de umbrales de inundación. Utilizando la función de imágenes históricas se puede comparar la misma ubicación antes y después de un evento hidrológico. Esto permitirá evaluar los cambios en la topografía y el entorno.

3.2.3. Análisis topográfico

El análisis topográfico es un componente esencial en la estimación de umbrales de inundación, ya que la topografía del terreno influye directamente en la manera en que el agua se desplaza y se acumula en una determinada área. A continuación, se describen los aspectos clave del análisis topográfico en la estimación de umbrales de inundación:

- **Modelado del terreno**

Utilizando datos topográficos, como modelos digitales de elevación (MDE) y cartografía detallada, se crea un modelo del terreno. Este modelo ayuda a visualizar la topografía de la cuenca hidrográfica, identificar las pendientes y determinar cómo el agua fluirá a través del paisaje.

- **Identificación de áreas bajas y elevadas**

Se identifican las áreas bajas y elevadas en la cuenca. Las áreas bajas son más propensas a la acumulación de agua durante eventos de lluvia intensa, mientras que las áreas elevadas pueden afectar la velocidad de escurrimiento. Los datos topográficos

ayudaran a identificar áreas de menor elevación, como llanuras aluviales o depresiones, que son propensas a inundaciones debido a su posición geográfica.

- **Análisis del flujo de agua**

Se realiza un análisis detallado del flujo de agua en el terreno. Esto implica la simulación de cómo el agua se desplaza desde las zonas altas hasta las áreas más bajas, teniendo en cuenta la topografía y la rugosidad del terreno, este análisis está relacionado con la pendiente del terreno, es decir Mediante datos topográficos, se calculará las pendientes del terreno. Las áreas con pendientes bajas o negativas, donde el agua puede acumularse, se consideran áreas de alto riesgo de inundación.

- **Identificación de cuellos de botella y áreas de retención**

Se buscan cuellos de botella naturales, como puentes estrechos o tramos con pendientes pronunciadas, que puedan obstaculizar el flujo del agua y provocar acumulaciones. También se identifican áreas donde el agua puede retenerse, como llanuras de inundación y zonas con suelos poco permeables.

- **Zonificación de inundación**

Basándose en el análisis topográfico y en modelos hidrológicos, se zonifican áreas susceptibles a inundaciones. Se determinan las áreas con mayor riesgo y se establecen umbrales de inundación considerando la topografía local, igualmente poder recopilar datos históricos sobre inundaciones en el área de estudio es fundamental. Esto permite determinar los niveles de agua que han causado inundaciones significativas en el pasado y establecer umbrales críticos en función de esa información

- **Incorporación de modelos hidráulicos**

La información topográfica se incorpora en modelos hidráulicos para simular el comportamiento del agua durante eventos de inundación. Estos modelos tienen en cuenta la geometría del terreno para prever cómo se propagará el agua y cuál será su nivel en diferentes ubicaciones.

- **Establecimiento de umbrales críticos**

Los resultados del análisis topográfico, combinados con datos hidrológicos, contribuyen al establecimiento de umbrales críticos. Estos umbrales representan los niveles de agua que, una vez alcanzados, indican un riesgo significativo de inundación.

- **Planificación de medidas de mitigación**

Con base en el análisis topográfico, se pueden planificar medidas de mitigación, como la construcción de infraestructuras de control de inundaciones o la implementación de zonas verdes estratégicas para absorber el exceso de agua

En resumen, el análisis topográfico, cuando se integra de manera efectiva con otros datos hidrológicos y climáticos, proporciona una base sólida para la estimación de umbrales de inundación y contribuye a una gestión más eficiente y precisa de los riesgos asociados con eventos extremos.

3.2.4. Umbrales críticos de inundación

Los umbrales de inundación en un río son niveles críticos de agua que, una vez alcanzados, pueden provocar inundaciones y representan puntos de referencia importantes para la gestión de riesgos y la toma de decisiones. Estos umbrales varían según la ubicación geográfica, las características del río y las condiciones climáticas, ante ello se suele definir tres (03) tipos de umbrales que son:

Tabla 2. Umbrales de inundación en sus tres niveles de rojo, naranja y amarillo

UMBRALES DE INUNDACIÓN	
UMBRAL AMARILLO 	Umbral de Atención (Precaución) Este es el nivel en el que las autoridades y las comunidades comienzan a monitorear de cerca las condiciones del río. Puede ser un nivel en el que se emitan advertencias y se aconseje a la población que esté alerta ante posibles inundaciones. No necesariamente implica una inundación inminente, pero indica que las condiciones son propicias para la ocurrencia.
UMBRAL NARANJA 	Umbral de Alerta (Preparación) Este nivel indica que hay una alta probabilidad de inundación y se deben tomar medidas preventivas. Las comunidades deben prepararse para evacuaciones, asegurar propiedades y tomar medidas para minimizar los daños potenciales. Se pueden emitir alertas a la población y se intensifican los esfuerzos de monitoreo.
UMBRAL ROJO 	Umbral de Emergencia (Acción Inmediata) Este es el nivel en el que se declara una emergencia y se implementan acciones de evacuación. Puede implicar inundaciones significativas con riesgo para la vida y la propiedad. Las autoridades toman medidas inmediatas para proteger a la población y los recursos.

Fuente: Elaboración propia

Los umbrales de inundación y los sistemas de alerta varían según los países y las regiones, su definición y gestión dependen de factores geográficos, climáticos, infraestructurales y culturales específicos:

- **Estados Unidos**

En los Estados Unidos, la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) desempeñan un papel crucial en la monitorización de inundaciones. Se utilizan mapas de inundación y modelos hidrológicos para definir zonas de riesgo. La clasificación de zonas de inundación incluye las zonas de inundación especial (SFHA, por sus siglas en inglés) con distintos niveles de riesgo

- **China**

China tiene una red extensa de estaciones de monitoreo del agua y utiliza sistemas de alerta temprana para gestionar inundaciones. La Administración del Agua de China establece umbrales específicos para ríos y embalses, y los equipos de respuesta actúan en consecuencia.

- **Países Bajos**

Dada la topografía baja y la amenaza constante de inundaciones, los Países Bajos han desarrollado sistemas avanzados de gestión del agua. Utilizan el concepto de "umbrales de peligro" y "umbrales de emergencia" para activar medidas de control de inundaciones, como la apertura de diques controlados.

- **Japón**

Japón utiliza un sistema de alerta de inundaciones que clasifica los niveles de alerta en función de la cantidad de precipitación y los niveles de los ríos. Se emiten alertas tempranas a la población y se toman medidas preventivas para minimizar los daños.

- **Australia**

Australia cuenta con la Oficina de Meteorología, que monitorea y emite advertencias de inundaciones. Utilizan mapas de inundación y umbrales específicos para determinar el riesgo y emitir alertas a la población.

En general, la gestión de inundaciones implica una combinación de monitoreo hidrológico, pronósticos meteorológicos, sistemas de alerta temprana y protocolos de respuesta a emergencias. La adaptabilidad de estos sistemas a las condiciones locales y las tecnologías disponibles es fundamental para una gestión efectiva del riesgo de inundaciones a nivel mundial.

En ese contexto, se puede definir el umbral rojo como el punto crítico que representa la capacidad máxima que la estructura puede soportar antes de experimentar un desborde o inundación. Este umbral es esencial para determinar los límites seguros y garantizar su integridad estructural. La capacidad máxima asociada al umbral rojo se calcula considerando factores como el área de la sección transversal de la caja hidráulica, la velocidad del flujo de agua, la topografía del área circundante y otros parámetros hidráulicos. Este cálculo se basa en modelos hidráulicos y análisis detallados que simulan diversas condiciones de flujo y escenarios de inundación, para ello se recurrió al modelado hidráulico del software HEC-RAS, existe la posibilidad de usar otros softwares libres como por ejemplo IBER, FLO-2D. Entonces, cuando el nivel de agua alcanza o supera el umbral rojo, indica que la capacidad de la caja hidráulica está llegando a su límite máximo y que existe un riesgo inminente de desbordamiento. Este umbral es crucial para la gestión de inundaciones y la prevención de daños significativos aguas abajo de la estructura hidráulica.

Por ejemplo, la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica) en los Estados Unidos desempeña un papel importante en la monitorización y predicción de eventos meteorológicos extremos, incluyendo inundaciones. Aunque la NOAA aborda una amplia gama de fenómenos, incluyendo huracanes, tormentas, y otros eventos climáticos, su enfoque en inundaciones a menudo involucra a la Agencia Nacional de Servicios Oceánicos y Atmosféricos (NWS, por sus siglas en inglés), que forma parte de la NOAA y se ocupa de los servicios de pronóstico del tiempo. La NOAA y la NWS

definen los umbrales de inundación utilizando un enfoque basado en estaciones hidrológicas y mediciones en tiempo real, estos enfoques involucran.

- Niveles de inundación
- Categorías de inundación
- Sistemas de Alerta Temprana
- Mapas de inundación

En resumen, la NOAA define los umbrales de inundación mediante la recopilación de datos hidrológicos, el análisis de patrones históricos y la aplicación de modelos predictivos. La información se utiliza para clasificar los niveles de inundación y proporcionar alertas tempranas a las comunidades en riesgo. Estos enfoques ayudan a gestionar los riesgos asociados con las inundaciones y a mitigar sus impactos en la población y la infraestructura.

Esta combinación de enfoques garantiza una ordenación efectiva de la información y contribuye a una presentación más fiel a las condiciones in situ del terreno, definiciones que se tiene de los umbrales de alerta propuesto por la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica), partiendo como estimación de cada umbral siguiendo las definiciones siguientes: **“Umbral Amarillo** condiciones de los arroyos y ríos están fuera de sus cauces, las inundaciones se limitan a vías verdes, tierras de cultivo y caminos secundarios aislados”. **“Umbral Naranja** las inundaciones se expanden en extensión espacial, lo que resulta en una mayor inundación de áreas agrícolas y recreativas. Pocas carreteras como cierres posibles” y **“Umbral Rojo** que estima como el punto crítico que representa la capacidad máxima que la estructura puede soportar antes de experimentar un desborde o inundación”.

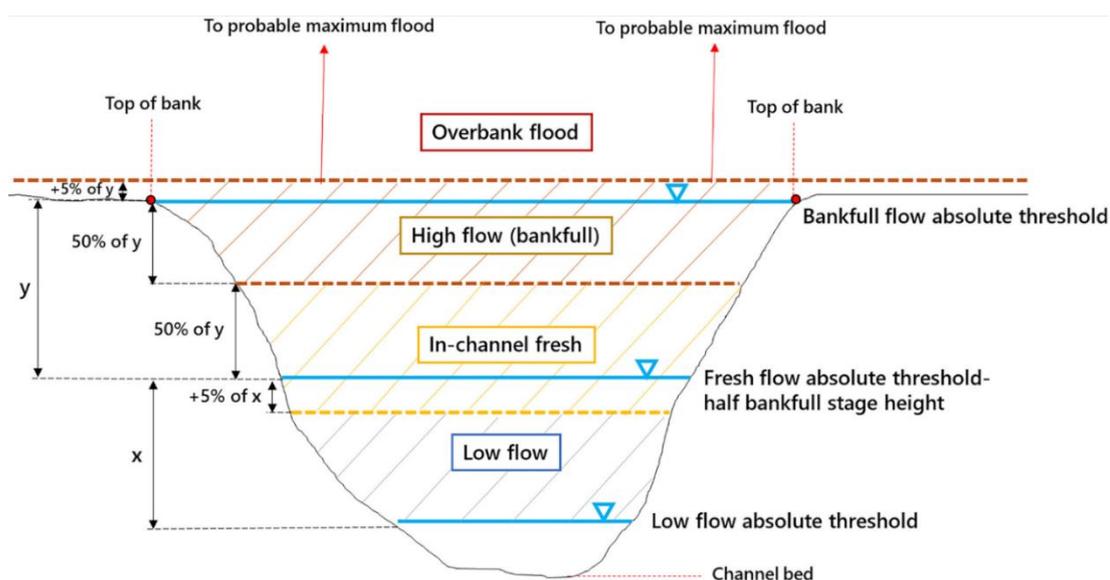


Figura 3. Sección esquemática transversal que muestra los umbrales de altura y los tipos de flujo que discurren por el cauce de análisis

Fuente: Tomado de Amir Mohammad Arash disponible en <https://doi.org/10.1002/esp.5694>

El estudio *Detection of decadal time-series changes in flow hydrology in eastern Australia: Considerations for river recovery and flood management* de Amir Mohammad Arash publicado en 2023, establece o identifica umbrales morfológicos en los sitios de medición como se muestra en la **Figura 3** relacionados a porcentajes de los valores de los tirantes hidráulicos en la sección.

De acuerdo a Amir, se identifican tres tipos de flujo utilizando los umbrales absolutos de flujo bajo, fresco en el canal y flujo alto (banco lleno). Un flujo fresco en el canal se clasifica como cualquier flujo que alcanza una altura de etapa que es 95 % mayor que el umbral absoluto de flujo bajo y 50 % mayor que el umbral absoluto de flujo fresco. Estos flujos inundarán la mayoría de las unidades geomórficas del río y parte de la vegetación del río. Un flujo alto se calcula como cualquier flujo que alcance una altura de etapa que sea un 50 % menor que el umbral absoluto de flujo lleno y un 5 % mayor que este umbral. Estos flujos inundarán todas las unidades geomórficas internas y llenarán una proporción significativa del canal. Una inundación desbordante es cualquier flujo que excede una altura de etapa superior al 5 % por encima del umbral absoluto de flujo de banco lleno. Estos flujos son las inundaciones fuera de canal más grandes registradas que inundan las llanuras aluviales y las áreas circundantes.

Otro enfoque, en la estimación de umbrales de inundaciones relacionado con niveles, es el estudio es de Erazo del 2017, que establece umbrales por categorías de niveles, es decir, define el concepto “Umbral de Nivel” como el valor máximo del nivel del agua en una sección transversal del río que delimita la etapa de hidrología seguimiento respecto de la posibilidad de ocurrencia de desbordamientos. A partir de este concepto, se tiene:

- **Umbral de monitoreo:** representa el nivel del río donde no hay posibilidad de desbordamiento o inundación.
- **Umbral de pre-alerta:** representa el nivel del río en el que existe la posibilidad de una rápida incrementar y por lo que es necesario dar un seguimiento continuo y detallado de la evolución del fenómeno.
- **Umbral de alerta:** representa el nivel del río donde Protección Civil, se deberá notificar a la población ubicada aguas abajo de la estación hidrométrica, debido a posibles inundaciones.
- **Umbral de emergencia:** representa el nivel del río donde se produce un desbordamiento inminente y ocurrirá una inundación.

Donde finalmente los valores finalmente se establecieron y se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Estimación de los umbrales de alerta en función al nivel máximo de agua en la sección de análisis

THRESHOLD	Level
MONITORING	0 a 50 % de nivel de inundación
PRE-WARNING	50 a 75 % de nivel de inundación
WARNING	75 a 90 % de nivel de inundación
ALERT	90 a 95 % de nivel de inundación
EMERGENCY	95 a 100 % de nivel de inundación

Fuente: Adaptado Adriana Erazo, 2017

La estimación de umbrales puede abordarse mediante un enfoque estadístico, representándolos como porcentajes tanto de nivel como de caudal. Sin embargo, es crucial considerar la influencia de trabajos de campo, es decir, de terreno, como la delimitación de secciones y áreas afectadas bajo escenarios de caudales máximos aguas abajo o aguas arriba dependiendo la configuración de la topografía del terreno y la ubicación de la estación hidrológica.

Este análisis se logra a través de un modelamiento hidráulico, que proporciona una comprensión más detallada y precisa de la afectación en términos de distribución espacial. Integrar datos hidráulicos con análisis estadísticos fortalece la robustez de las estimaciones, permitiendo una presentación más completa y respaldada técnicamente. En el marco del modelado hidráulico realizado mediante el software HEC-RAS, se prioriza la evaluación de la seguridad y estabilidad del sistema ante niveles de agua críticos.

Un aspecto crucial de este análisis es la verificación y validación de la inexistencia de desbordamientos aguas abajo relacionados a una visualización espacial del comportamiento del flujo estimado como máximo, este enfoque particularmente en relación con los umbrales amarillo y naranja. Utilizando datos geospaciales y caudales representativos en los puntos de monitoreo. Bajo el Umbral Amarillo y Umbral Naranja, no se deberían de registrar desbordamientos aguas abajo ni aguas arriba tomando como referencia la estación hidrológica, un modelamiento hidráulico demuestra una capacidad robusta para gestionar los niveles de agua asociados con estos umbrales, sin que se generaran condiciones no deseadas de desbordamiento.

Es por ello que, en relación a los diversos métodos de estimación de umbrales de inundaciones por las diferentes agencias internacionales y/o estudios, se plantea la consideración:

Umbral Amarillo como el valor del nivel de agua en el cual empieza a existir un desborde dentro de la sección hidráulica, este desborde afecta principalmente zonas agrícolas que se

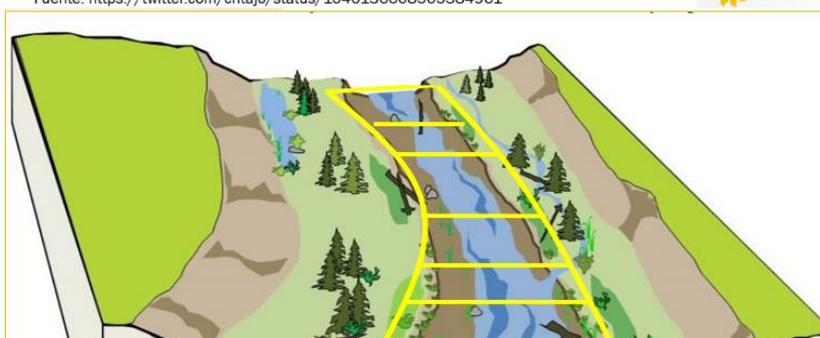


Figura 4. Estimación del umbral amarillo considerando una sección típica del cauce en la región norte

ubicar dentro del cauce, esta inundación se limita a vías verdes, tierras de cultivo y caminos secundarios aislados, este cambio se puede observar en la visualización de las secciones transversales a lo largo de longitud del río.

Respecto al **Umbral Naranja** se establece una serie de niveles o cotas absolutas definidos como crecidas de máximas ordinarias que están basados en consultas in situ ante la población aledaña al cauce del río y/o aguas arriba o aguas abajo,

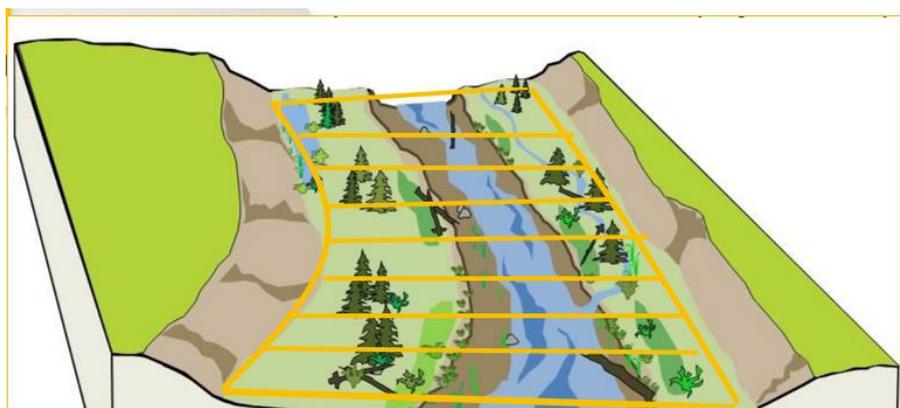


Figura 5. Estimación del umbral naranja considerando una sección típica del cauce en la región norte

Finalmente el **Umbral Rojo** está definido bajo el escenario del modelamiento hidráulico donde existe el inminente desborde del caudal que discurre por el cauce, así mismo cada uno de los umbrales están sujetos a verificaciones aguas abajo y/o aguas arriba de las afectaciones, igualmente la estimación de los umbrales estará sujeto a un valor de nivel de agua definidos en cotas relativas y/o absolutas para cada estación hidrológica, y estos valores de niveles serán transformados a caudales bajo la curva vigente en el punto de control, se precisa que los umbrales de niveles deberían de permanecer invariables en el tiempo, más no los umbrales de caudales siempre están sujetos a cambios y/o modificaciones.

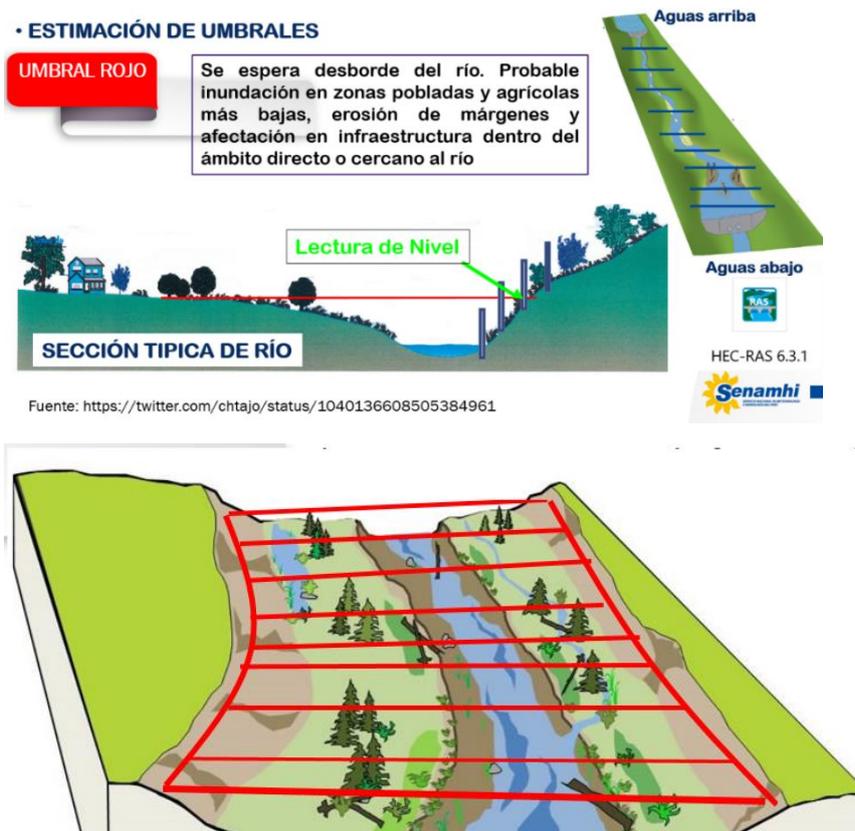


Figura 6. Estimación del umbral rojo considerando una sección típica del cauce en la región norte

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A través del modelamiento hidráulico con el software HEC-RAS, se ha estimado los caudales y velocidades máximas para diferentes secciones de estudio en los puntos de control en la cuenca Chira. Estos valores representan los niveles críticos de agua en los que se espera que se produzcan inundaciones en diversas ubicaciones a lo largo de los cursos de agua. Los umbrales de inundación son esenciales para identificar las áreas en riesgo y para la planificación de medidas de mitigación de inundaciones, la gestión de emergencias y la toma de decisiones informadas relacionadas con eventos hidrológicos extremos. Estos umbrales proporcionan un marco sólido para la protección de la población y la infraestructura en la región. Los caudales y velocidades máximas generadas por el modelo HEC-RAS para las secciones de estudio se presentan a continuación. Estos resultados se basan en los datos topográficos, hidrológicos recopilados y el modelamiento hidráulico realizado.

4.1. Estación hidrológica EHA PUENTE ÑÁCARA

Para el modelamiento realizado se consideró la progresiva donde se ubica la regla, ya que se tiene registrado en esta sección la cota máxima alcanzada en el 2017. Se consideró, además, una pendiente aguas arriba de 0.07 % (0.0007 mm) y una pendiente aguas abajo de 0.05 % (0.0005 mm), una rugosidad de 0.0589 la cota del nivel de agua

a 78.28 msnm representa un tirante de 1.44 m y la cota del nivel máximo 84.33 msnm es equivalente a un tirante de 7.49 msnm (umbral rojo generado con datos de campo).

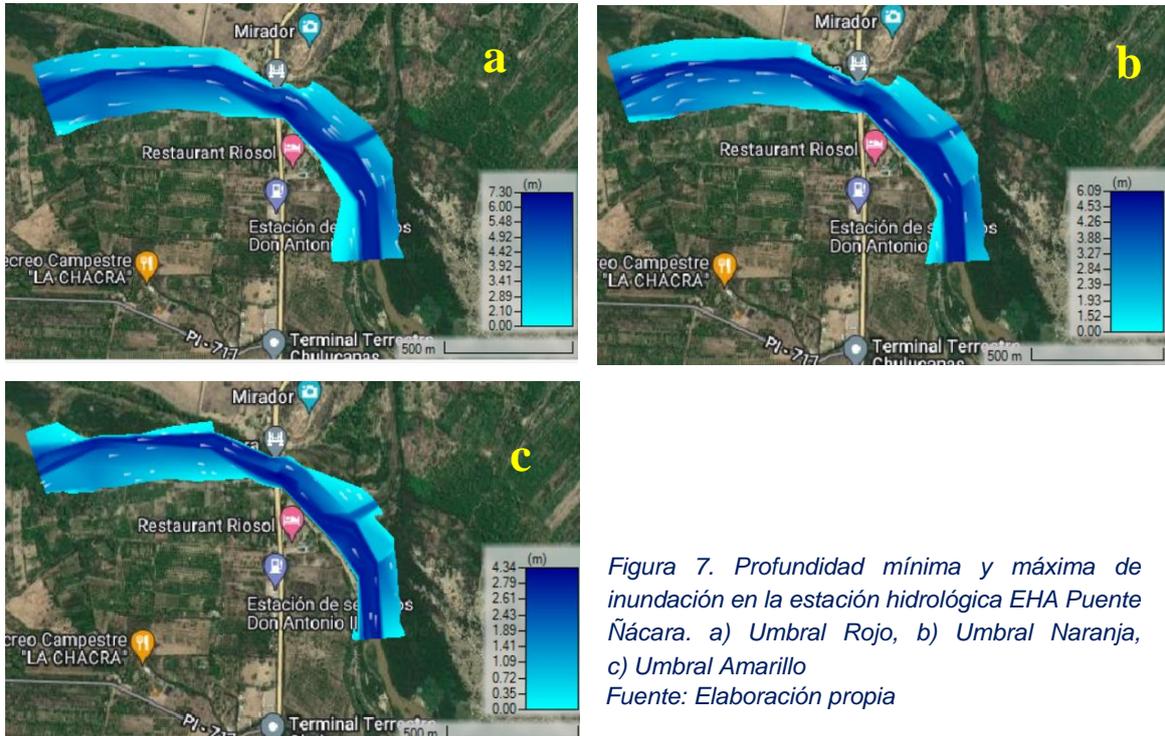


Figura 7. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Puente Nácara. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo
Fuente: Elaboración propia

Con estos parámetros establecidos, se generaron caudales máximos; como umbrales de inundaciones se tiene en la **Tabla 4**, correspondientes a los niveles de rojo, naranja y amarillo respectivamente, como se muestra en **Figura 8**, también se generaron las velocidades máximas alcanzando los 1.95 m/s centro.

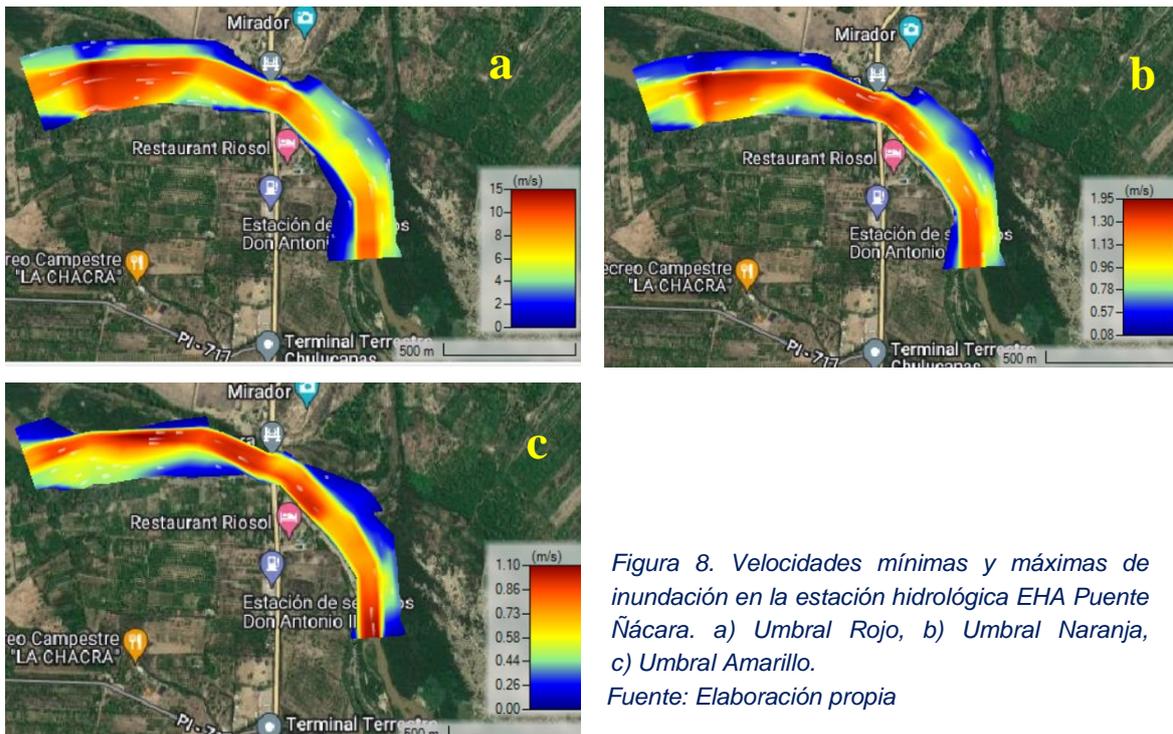


Figura 8. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Puente Nácara. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo.
Fuente: Elaboración propia

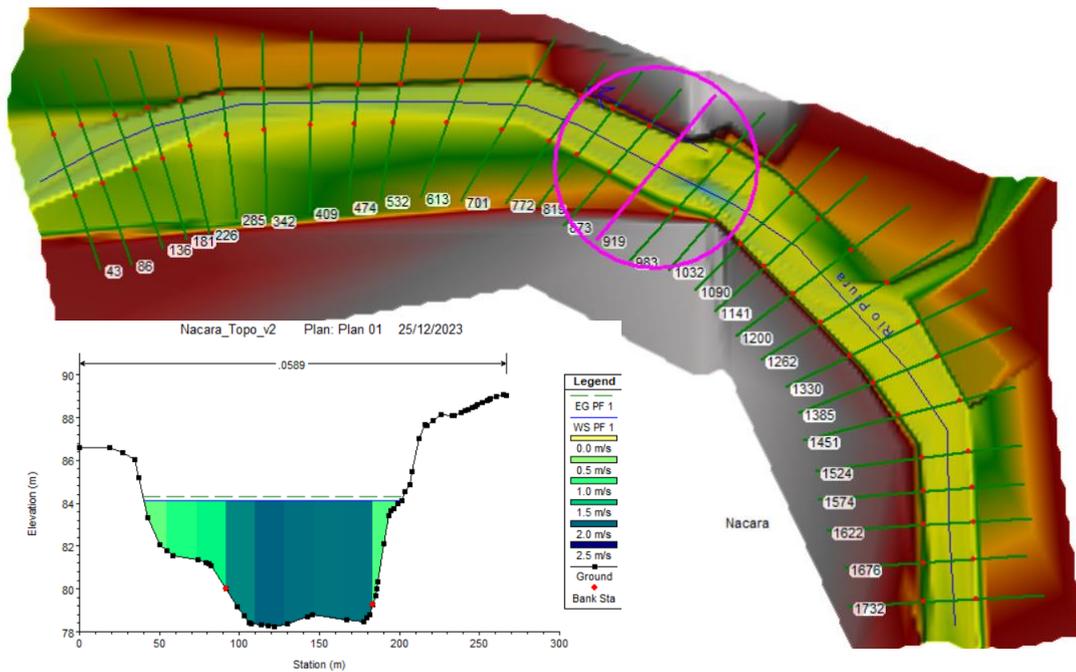


Figura 9. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en Puente Ñácará
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Puente Ñácará

Caudal (m ³ /s)	Cota (m.s.n.m)	Regla limnimétrica (m)	Tiempo de retorno (Años)
1151	82	3.89	53
690	82	2.92	7.9
218	82	1.46	2

Fuente: Elaboración propia

Los umbrales estimados están sujetos a ajustes y calibración tomando como referencia aforos realizados por parte de la Dirección Zonal y la Dirección de Hidrología y huellas hídricas en la visita de campo.

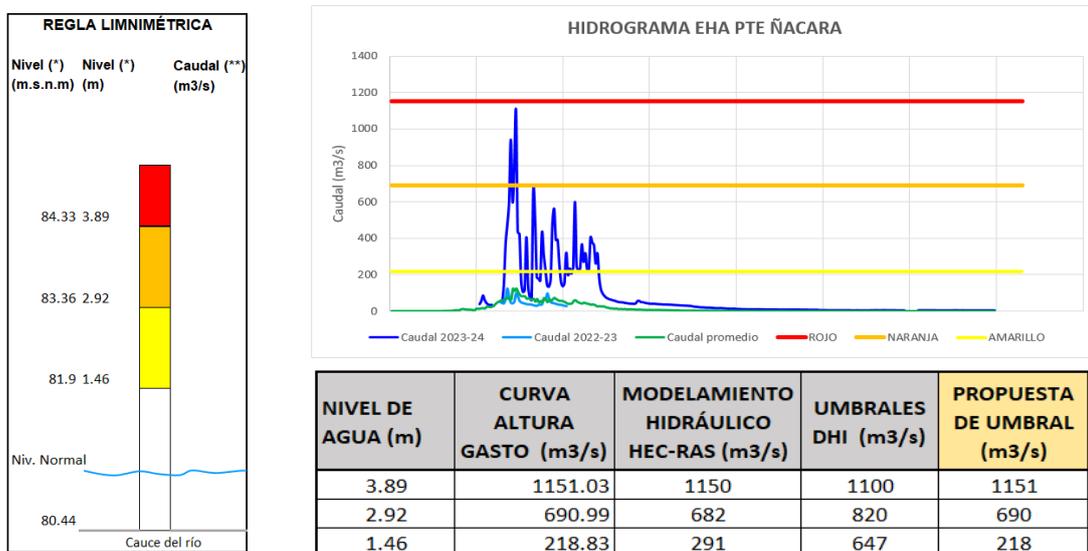


Figura 10. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Puente Ñácará.

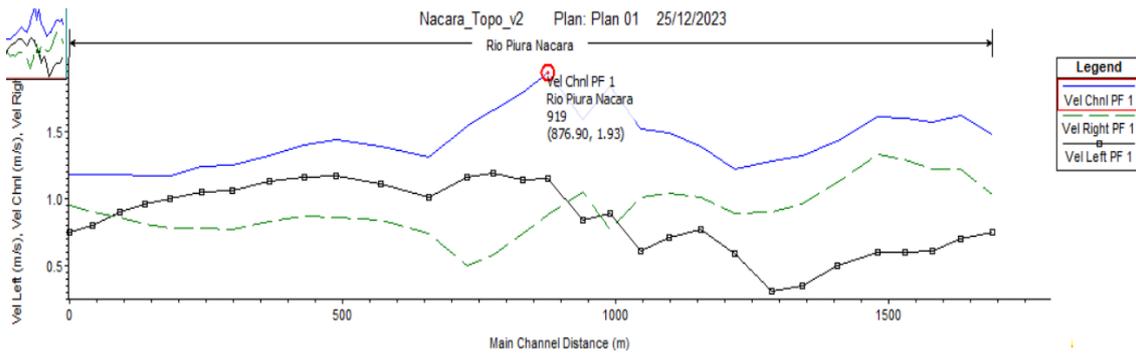


Figura 11. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Puente Nácara.

4.2. Estación hidrológica EHA SAN PEDRO

Se consideró la progresiva correspondiente a la sección de máximo nivel de aguas alcanzadas en el año 2017 (Fuente vigilante de la estación hidrológica y referencias del hidrólogo de la zonal Piura), cabe mencionar que esta progresiva también corresponde a la posición actual de la regla. Para el modelamiento hidráulico se consideró una pendiente aguas arriba de 2.96 % (0.0296 mm) y una pendiente aguas abajo de 1.03 % (0.0103mm), además se trabajó con una rugosidad de 0.1275. De igual manera, se consideró una cota del nivel de agua de 225.13 msnm equivalente a un tirante de 0.71 m y una cota del nivel máximo de 230.50 msnm que corresponde a un tirante de 6.08 m (umbral rojo generado con datos de campo).

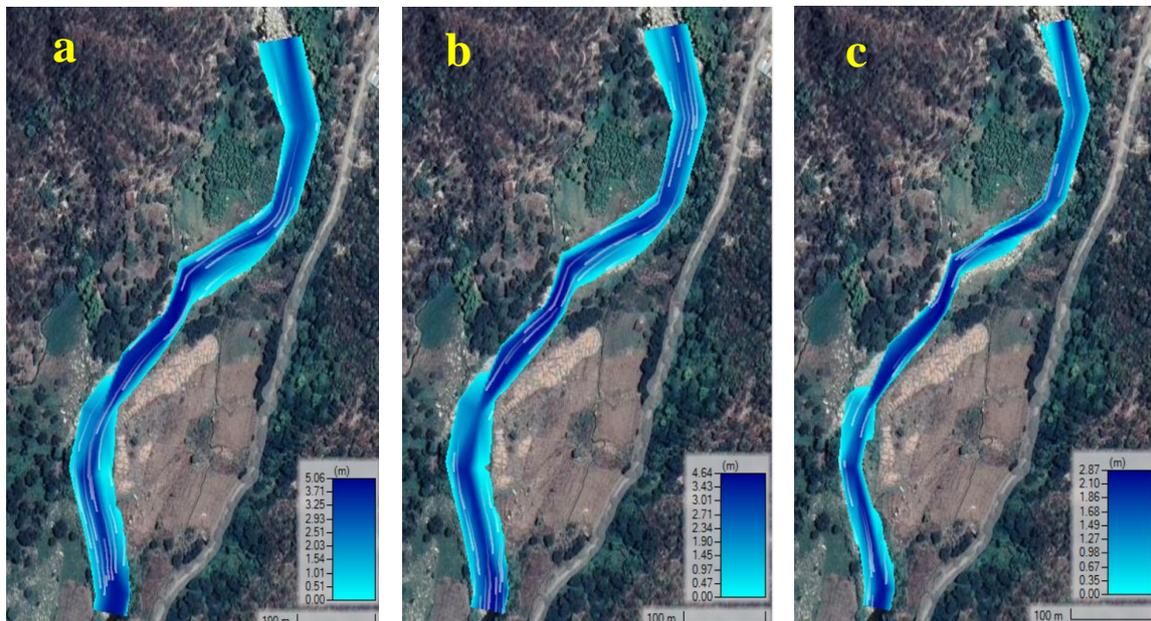


Figura 13. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA San Pedro. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo

Fuente: Elaboración propia

Con estos parámetros establecidos, se generaron caudales máximos, como umbrales de inundaciones se muestra en la **Tabla 5**, correspondientes a los niveles de rojo, naranja y amarillo respectivamente, como se muestra en la **Figura 14**, también se generaron las velocidades máximas alcanzando los 3.27 m/s en la margen central, mientras que en la margen derecha se tuvo una velocidad de 2.1 m/s y finalmente en la margen izquierda un valor de 1.2 m/s.

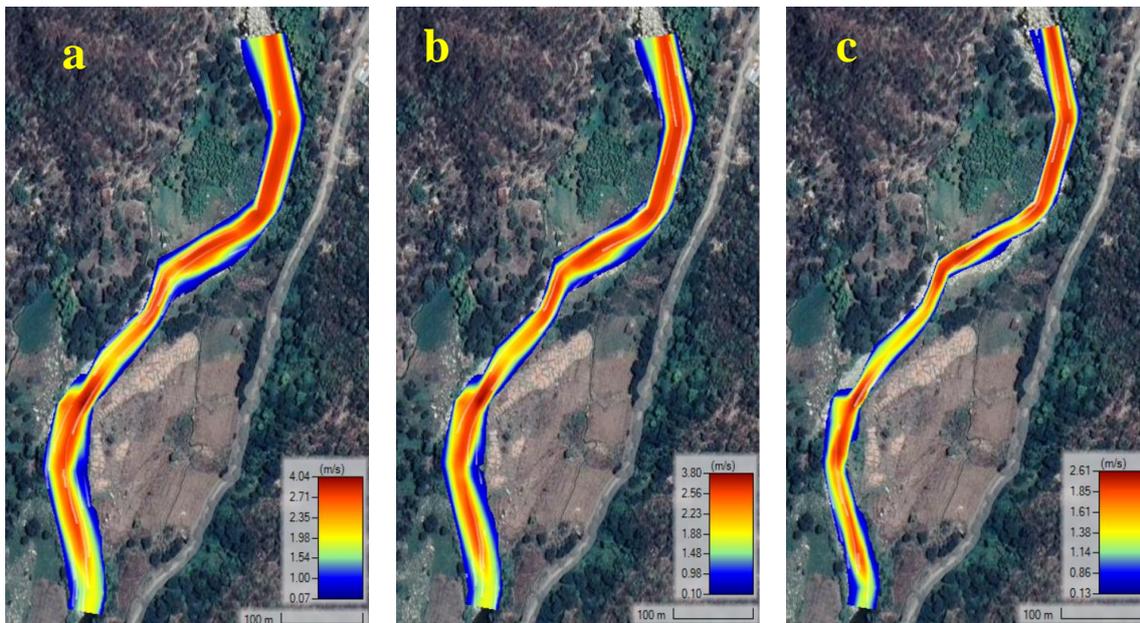


Figura 14. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA San Pedro. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo

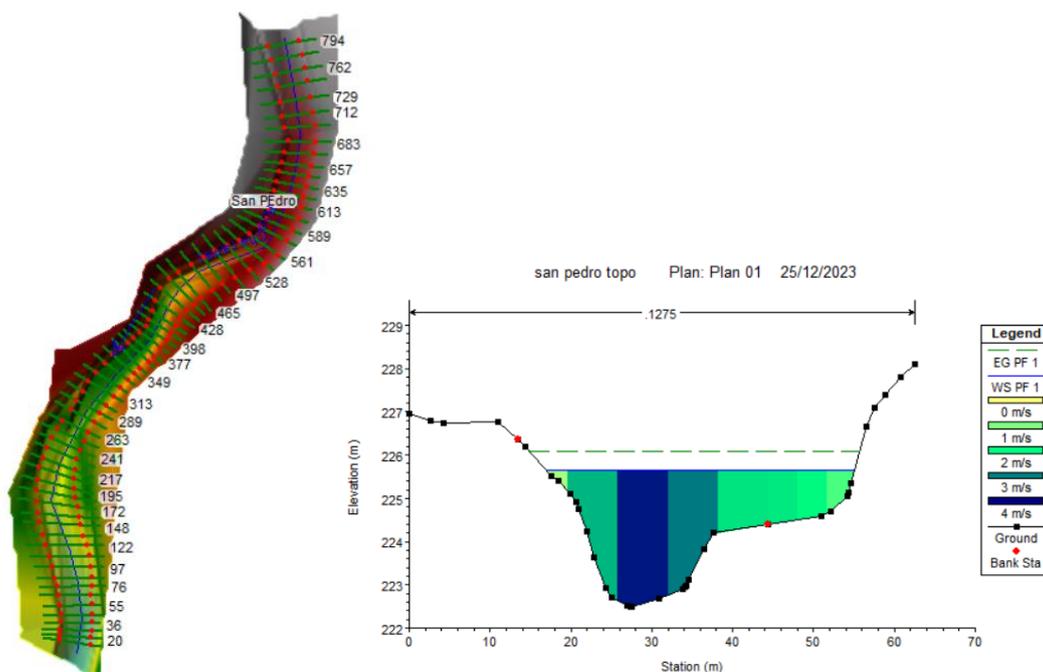


Figura 15. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnométrica en San Pedro
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA San Pedro

Caudal (m ³ /s)	Cota (m.s.n.m)	Regla limnimétrica (m)
222	230.5	6.12
183	229.94	5.56
60	227.61	3.23

Fuente: Elaboración propia

Los umbrales estimados están sujetos a ajustes y calibración tomando como referencia aforos realizados por parte de la Dirección Zonal y la Dirección de Hidrología y huellas hídricas en la visita de campo.

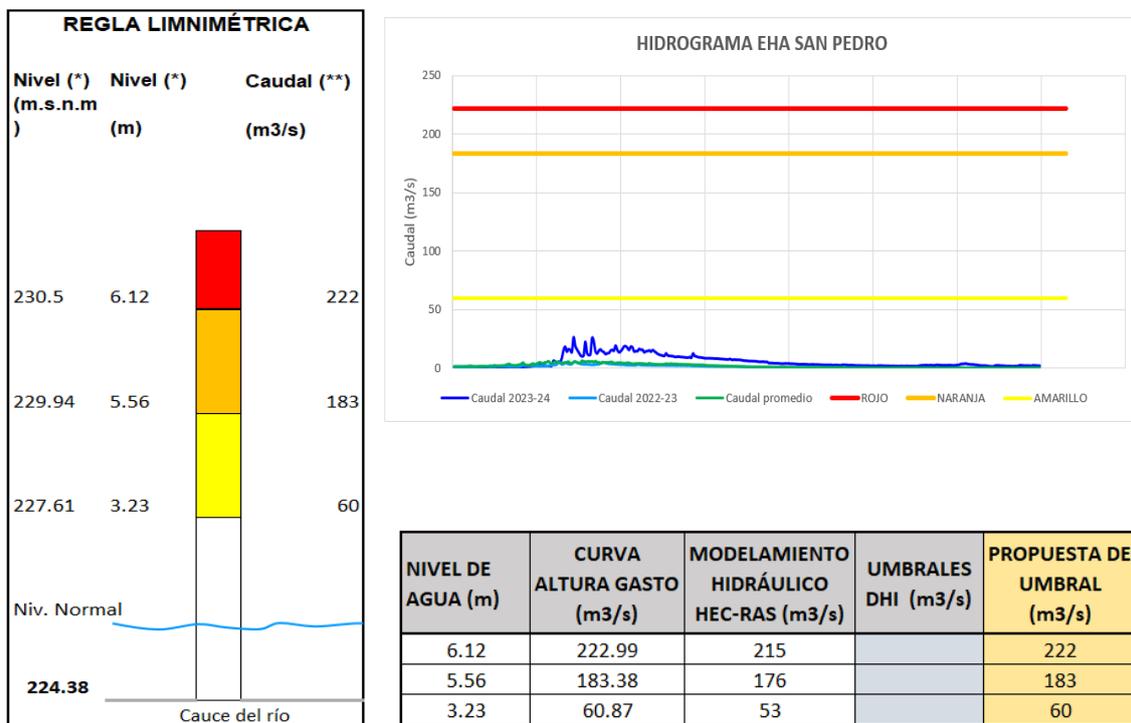


Figura 16. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA San Pedro

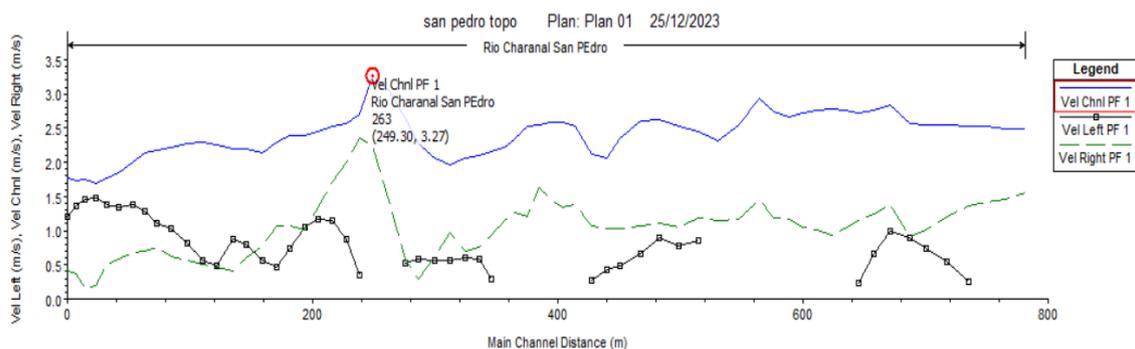


Figura 17. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA San Pedro

4.3. Estación hidrológica EHA HACIENDA BARRIOS

Se consideró la progresiva que corresponde a la sección de máximo nivel de aguas alcanzadas en el año 2017 (Fuente: vigilante de la Estación Hidrológica Automática). En el modelamiento hidráulico con HEC-RAS, se consideró los siguientes parámetros: una pendiente aguas arriba de 1.82 % (0.0182 mm) y una pendiente aguas abajo de 2.31 % (0.0231mm), rugosidad de 0.050, una cota del nivel de agua de 293.19 msnm, la cual corresponde a un tirante de 0.32 m y una cota del nivel máximo de 295.95 msnm, la cual corresponde a un tirante de 2.47 m (umbral rojo generado con datos del nivel máximo).

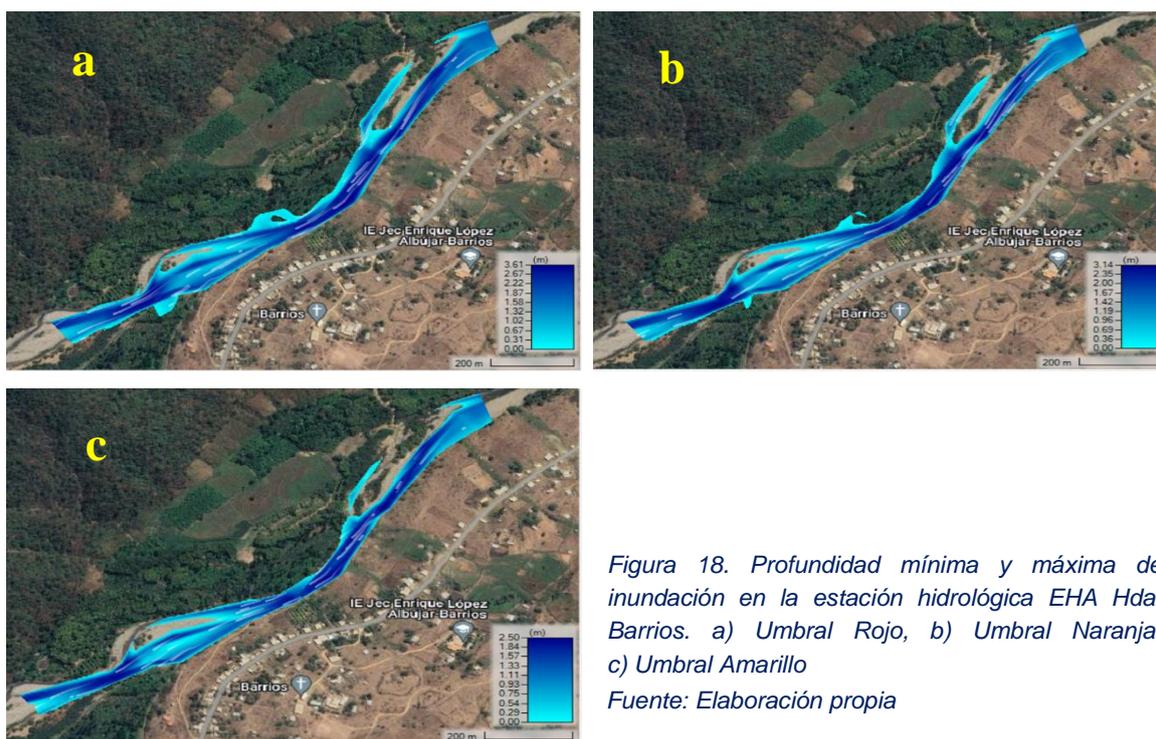


Figura 18. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Hda. Barrios. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo
Fuente: Elaboración propia

Con estos parámetros establecidos, se generaron caudales máximos, como umbrales de inundaciones como se muestra en la **Tabla 6**, correspondientes a los niveles de rojo, naranja y amarillo respectivamente, como se muestra en **Figura 19**, también se generaron las velocidades máximas alcanzando los 2.53 m/s.

Tabla 6. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Hda. Barrios

Caudal (m ³ /s)	Cota (m.s.n.m)	Regla limnimétrica (m)	Tiempo de retorno (Años)
367	295.95	2.77	61.1
277	295.68	2.5	48
159	295.25	2.07	4.4

Fuente: Elaboración propia

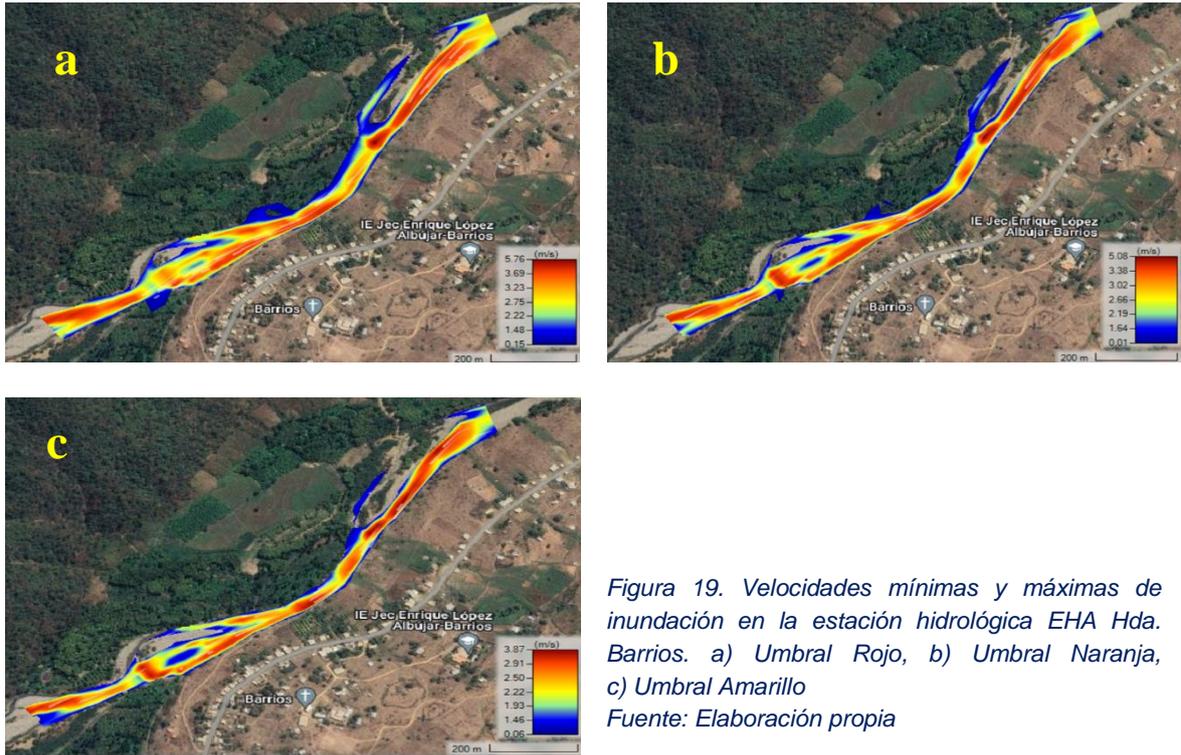


Figura 19. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Hda. Barrios. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo
Fuente: Elaboración propia

Los umbrales estimados están sujetos a ajustes y calibración tomando como referencia aforos realizados por parte de la Dirección Zonal y la Dirección de Hidrología y huellas hídricas en la visita de campo.

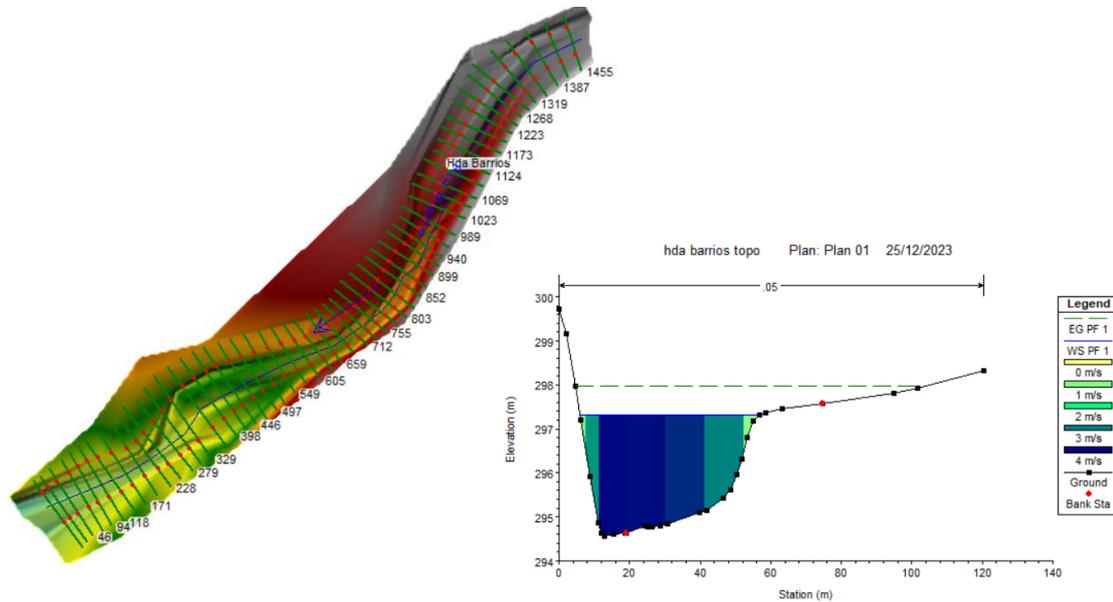


Figura 20. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en Hda. Barrios
Fuente: Elaboración propia

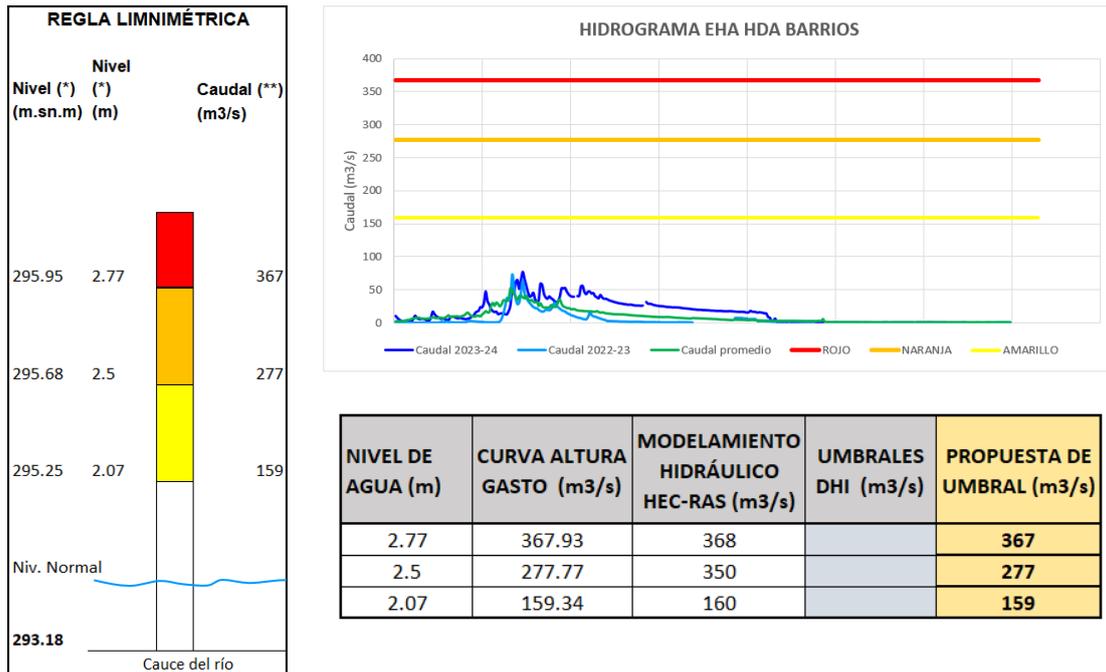


Figura 21. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Hda. Barrios.

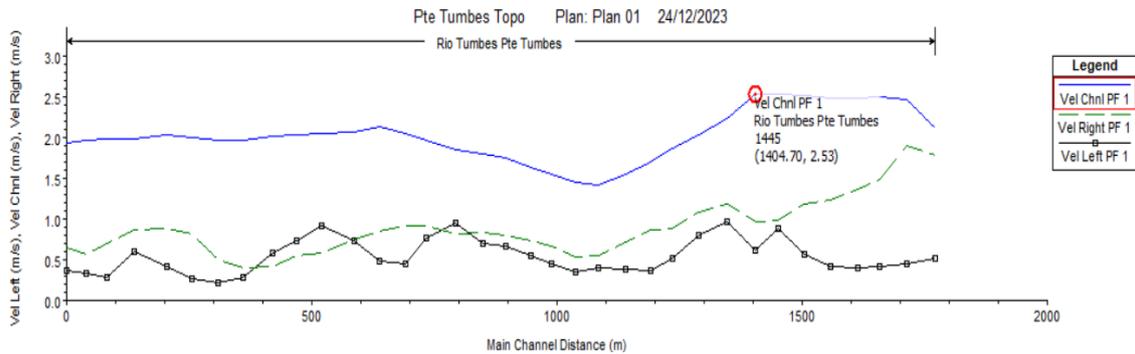


Figura 22. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Hda. Barrios.

4.4. Estación hidrológica EHA SALITRAL

Se consideró la progresiva que corresponde a la sección máximo nivel de aguas alcanzadas en el año 2017 (Fuente: vigilante de la Estación Hidrológica Automática). Se consideró para el modelamiento hidráulico con HEC-RAS, los siguientes parámetros: una pendiente aguas arriba de 0.11% (0.0011 mm) y una pendiente aguas abajo de 0.21% (0.0021mm), rugosidad de 0.1275, una cota del nivel de agua de 183.60 msnm, la cual corresponde a un tirante de 1.80 m y una cota del nivel máximo de 156.78 msnm, la cual corresponde a un tirante de 4.98 m (umbral rojo generado con datos del nivel máximo del 2017).

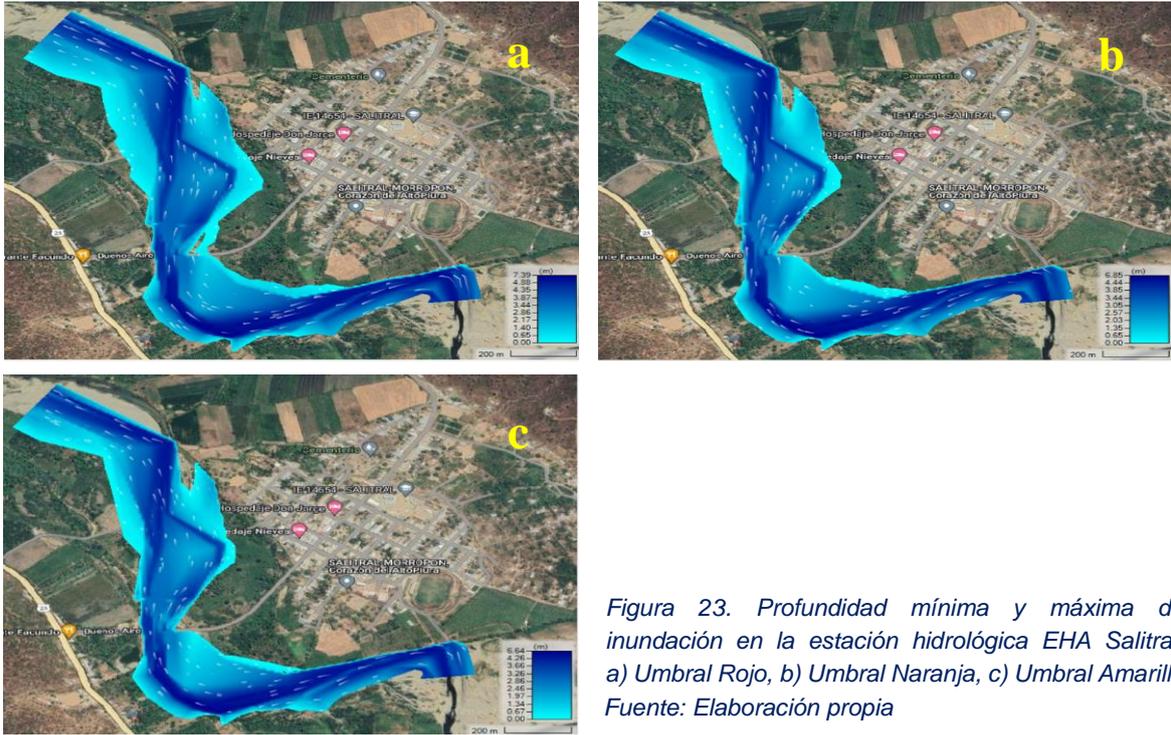


Figura 23. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Salitral. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo Fuente: Elaboración propia

Con estos parámetros establecidos, se generaron caudales máximos, como umbrales de inundaciones como se muestra en la **Tabla 7**, correspondientes a los niveles de rojo, naranja y amarillo respectivamente, como se muestra en **Figura 24**, también se generaron las velocidades máximas alcanzando los 1.58 m/s.

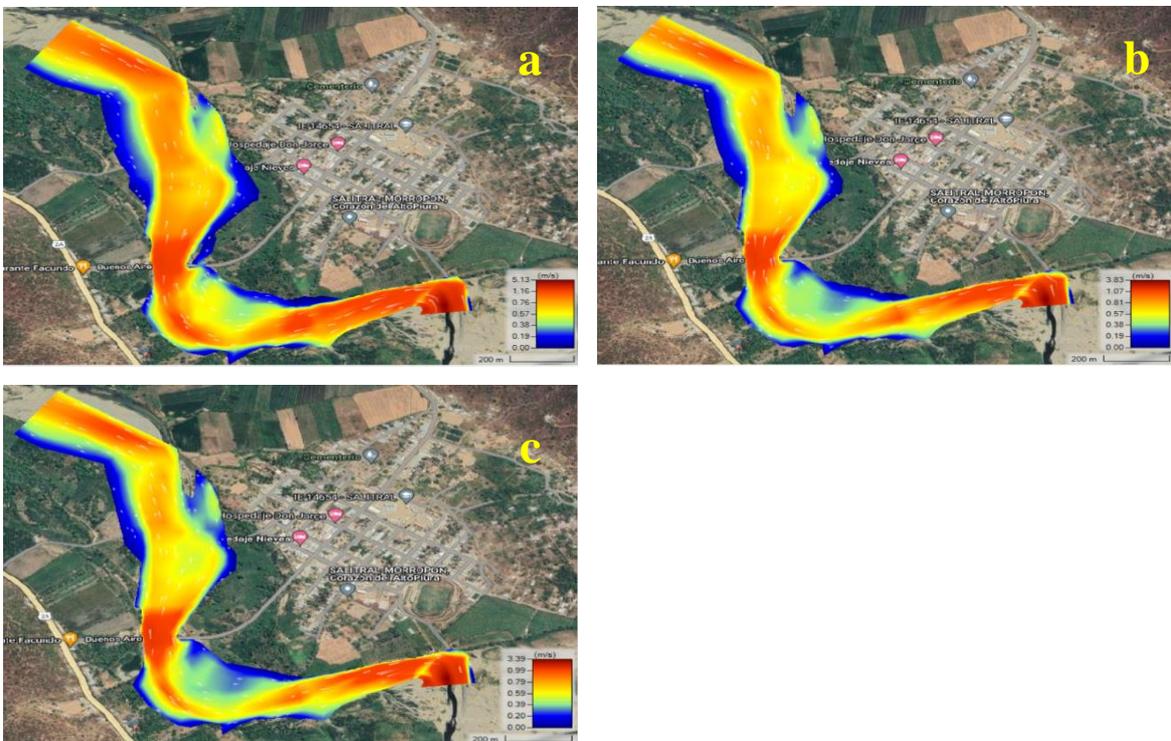


Figura 24. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Salitral. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Salitral

Nivel (m)	Cota (m.s.n.m)	Regla limnimétrica (m)
553	156.78	4.92
413	155.97	4.11
366	155.7	3.84

Fuente: Elaboración propia

Los umbrales estimados están sujetos a ajustes y calibración tomando como referencia aforos realizados por parte de la Dirección Zonal y la Dirección de Hidrología y huellas hídricas en la visita de campo.

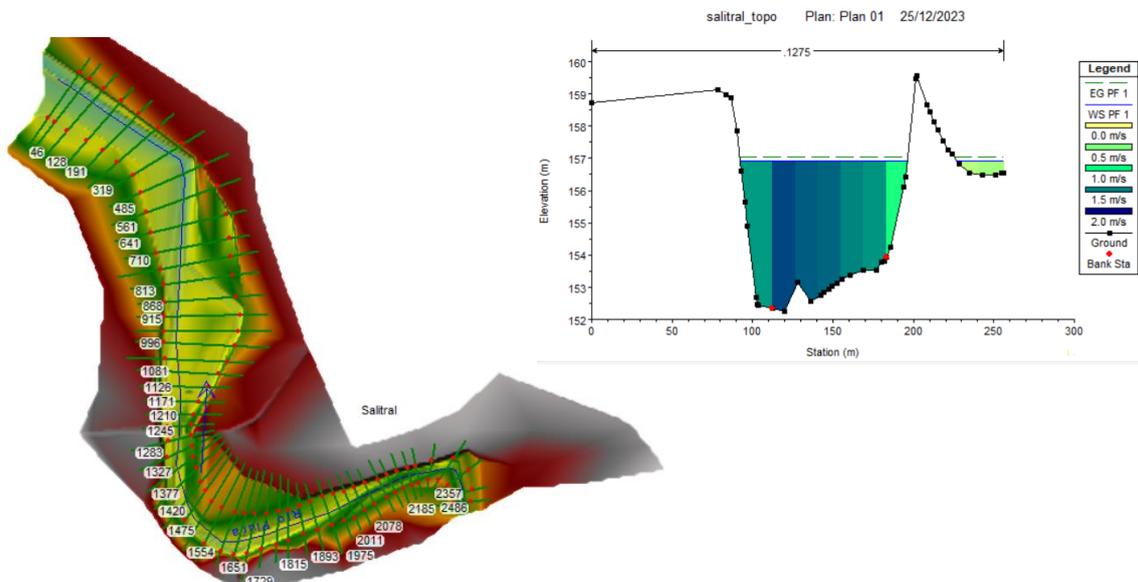


Figura 25. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en Salitral

Fuente: Elaboración propia

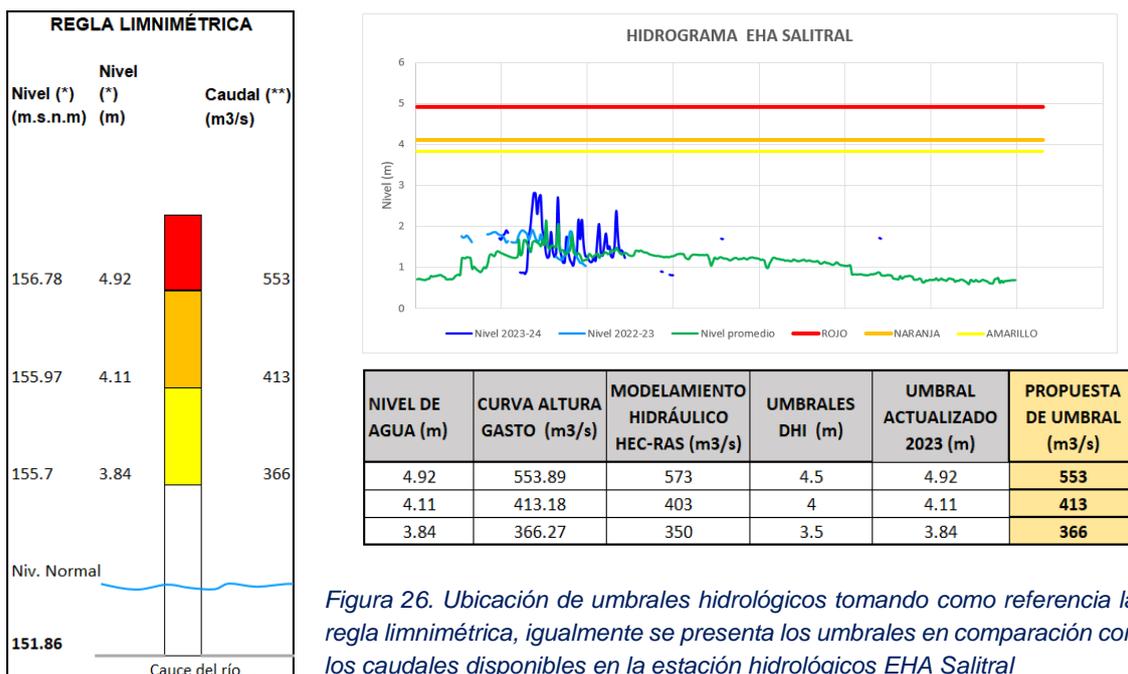


Figura 26. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Salitral

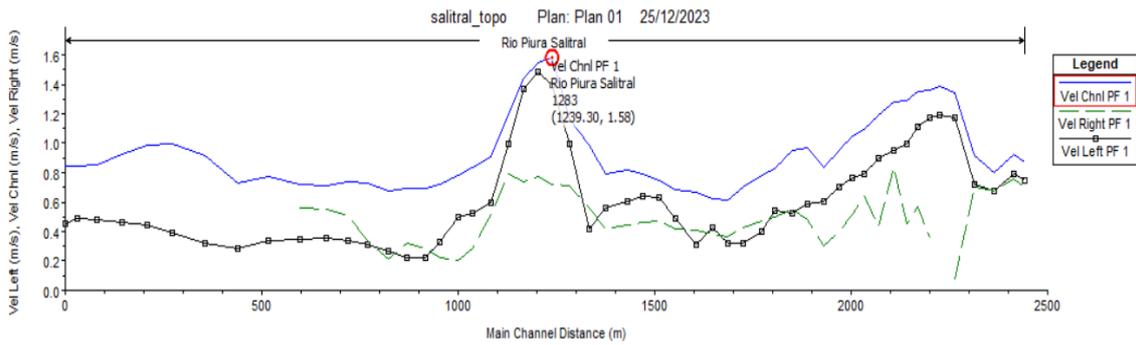


Figura 27. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Salitral

4.5. Estación hidrológica EHA TAMBOGRANDE

Se consideró la progresiva corresponde a la sección máximo nivel de aguas alcanzadas en el año 2017 (Fuente: vigilante de la Estación Hidrológica Automática). Se consideró para el modelamiento hidráulico con HEC-RAS, los siguientes parámetros: una pendiente aguas arriba de 0.2 % (0.002 mm) y una pendiente aguas abajo de 0.05 % (0.0005mm), rugosidad de 0.04, una cota del nivel de agua de 56.03 msnm, la cual corresponde a un tirante de 1.51 m y una cota del nivel máximo de 61.51 msnm, la cual corresponde a un tirante de 7.43 m (Umbral Rojo generado con datos del nivel máximo del 2017).

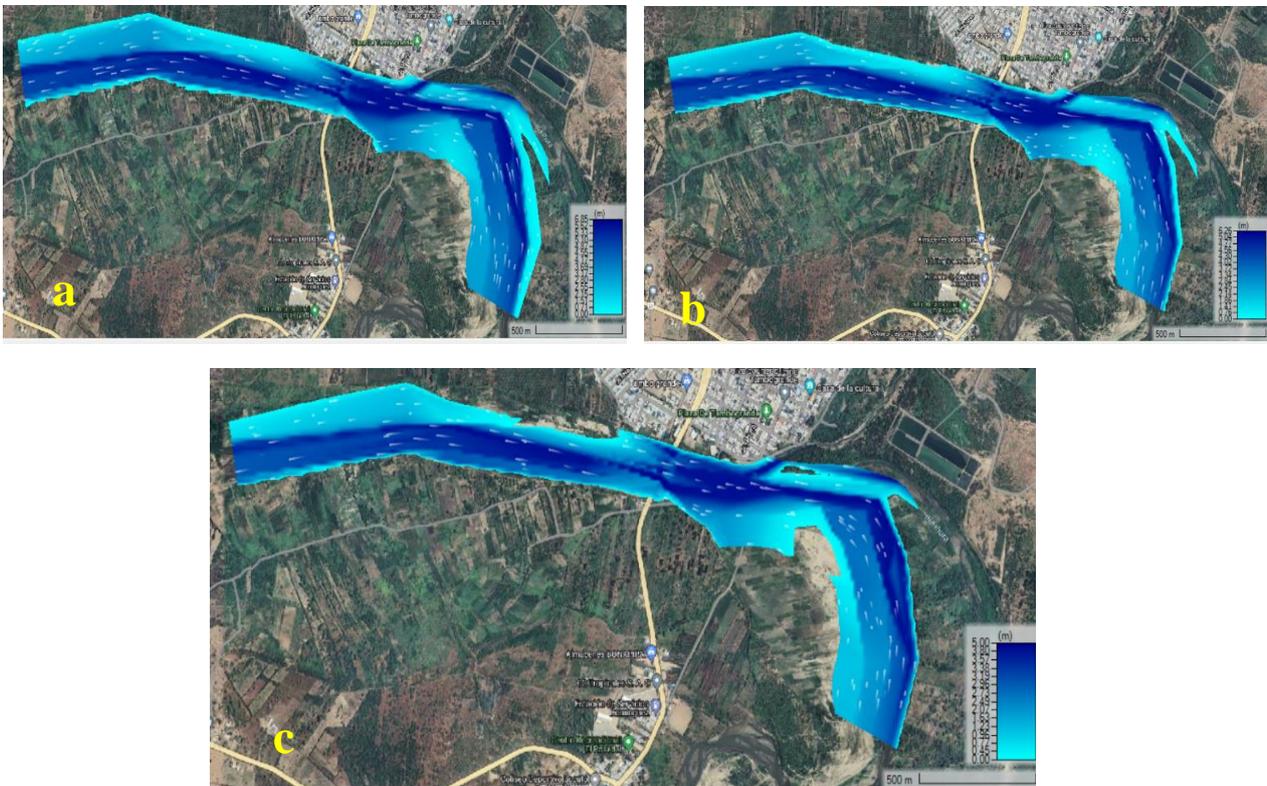


Figura 28. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Tambogrande. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo

Fuente: Elaboración propia

Con estos parámetros establecidos, se generaron caudales máximos, como umbrales de inundaciones como se muestra en la **Tabla 8**, correspondientes a los niveles de rojo, naranja y amarillo respectivamente, como se muestra en **Figura 29**, también se generaron las velocidades máximas alcanzando los 1.90 m/s.

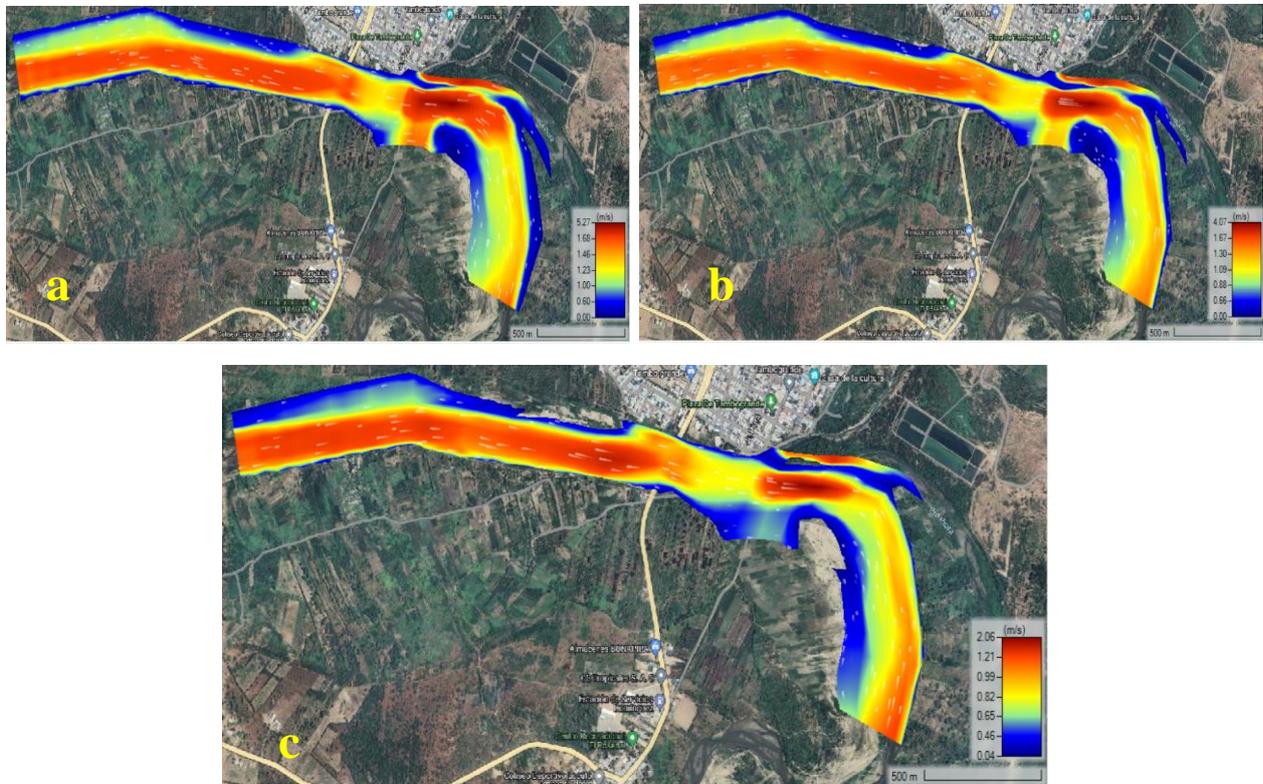


Figura 29. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Tambogrande. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Tambogrande

Caudal (m ³ /s)	Cota (m.s.n.m)	Regla limnimétrica (m)
1474	61.51	6.91
1138	60.91	6.31
570	59.55	4.95

Fuente: Elaboración propia

Los umbrales estimados están sujetos a ajustes y calibración tomando como referencia aforos realizados por parte de la Dirección Zonal y la Dirección de Hidrología y huellas hídricas en la visita de campo.

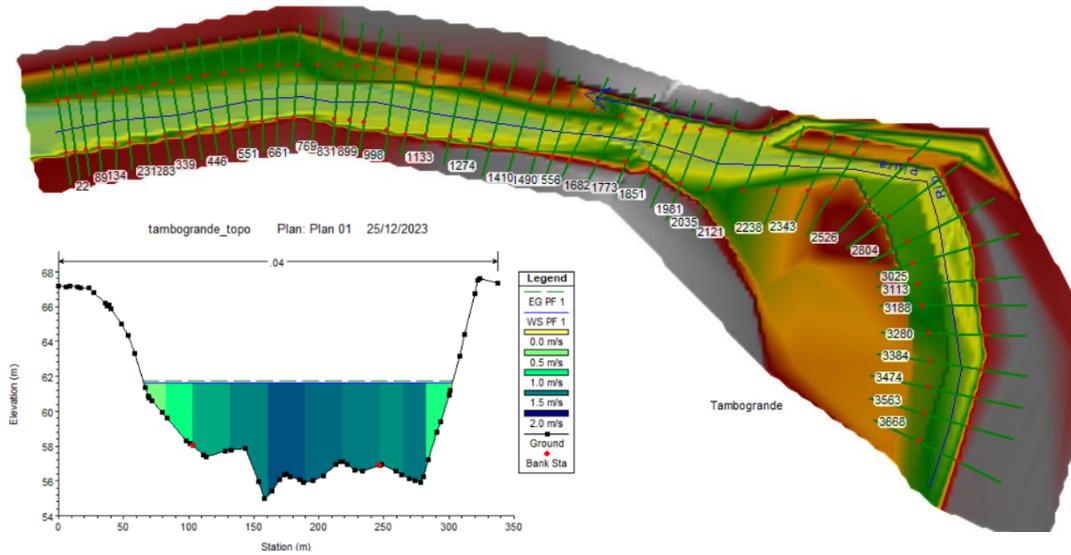


Figura 30. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en Tambogrande
Fuente: Elaboración propia

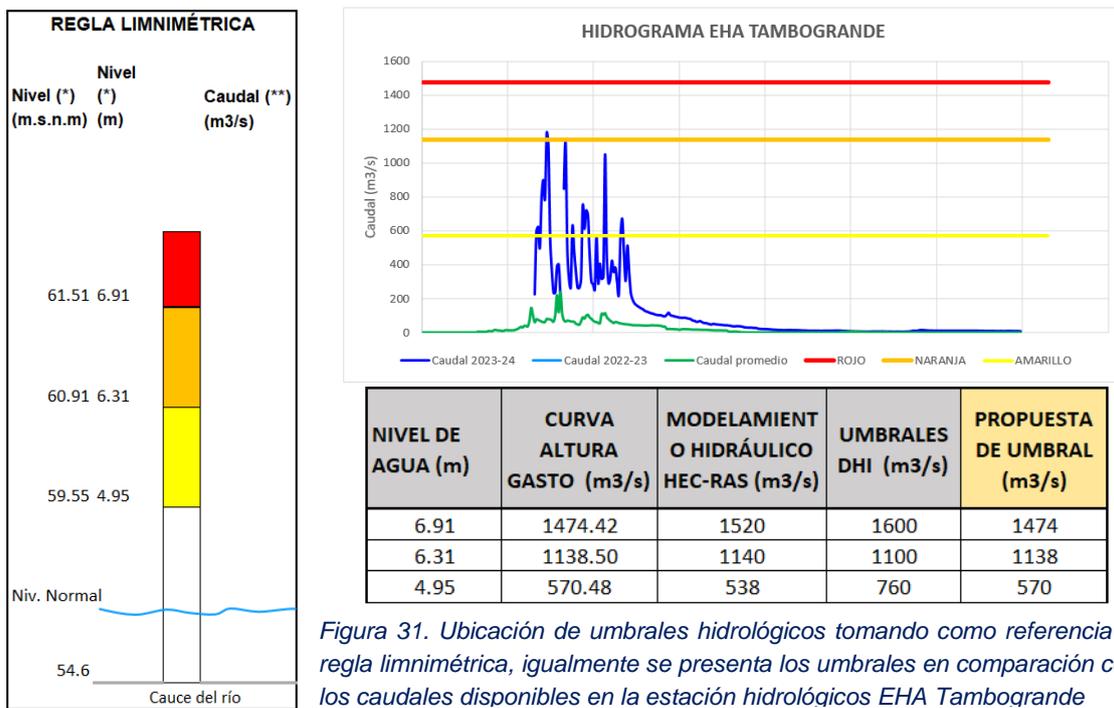


Figura 31. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Tambogrande

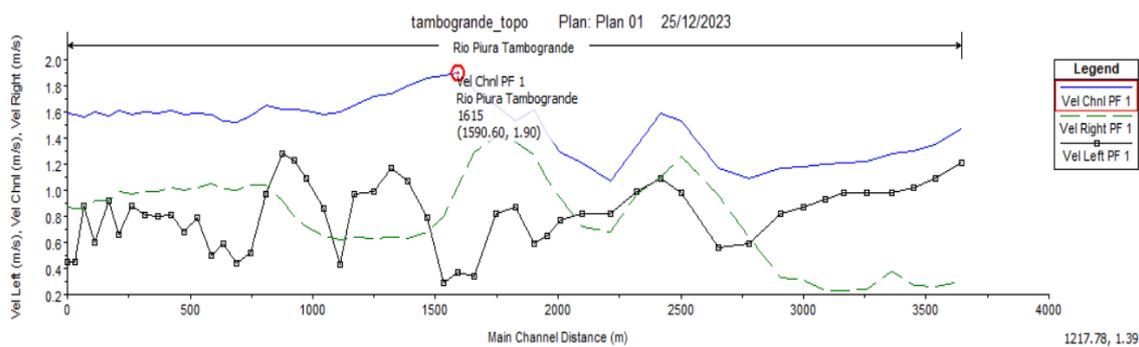


Figura 32. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Tambogrande

4.6. Estación hidrológica EHA LAGARTERA

Se consideró la progresiva corresponde a la sección máximo nivel de aguas alcanzadas en el año 2017 (Fuente: vigilante de la Estación Hidrológica Automática). Se consideró para el modelamiento hidráulico con HEC-RAS, los siguientes parámetros: una pendiente aguas arriba de 1.82 % (0.0182 mm) y una pendiente aguas abajo de 2.31 % (0.0231mm), rugosidad de 0.050, una cota del nivel de agua de 293.19 msnm, la cual corresponde a un tirante de 0.32 m y una cota del nivel máximo de 295.95 msnm, la cual corresponde a un tirante de 2.47 m (umbral rojo generado con datos del nivel máximo).

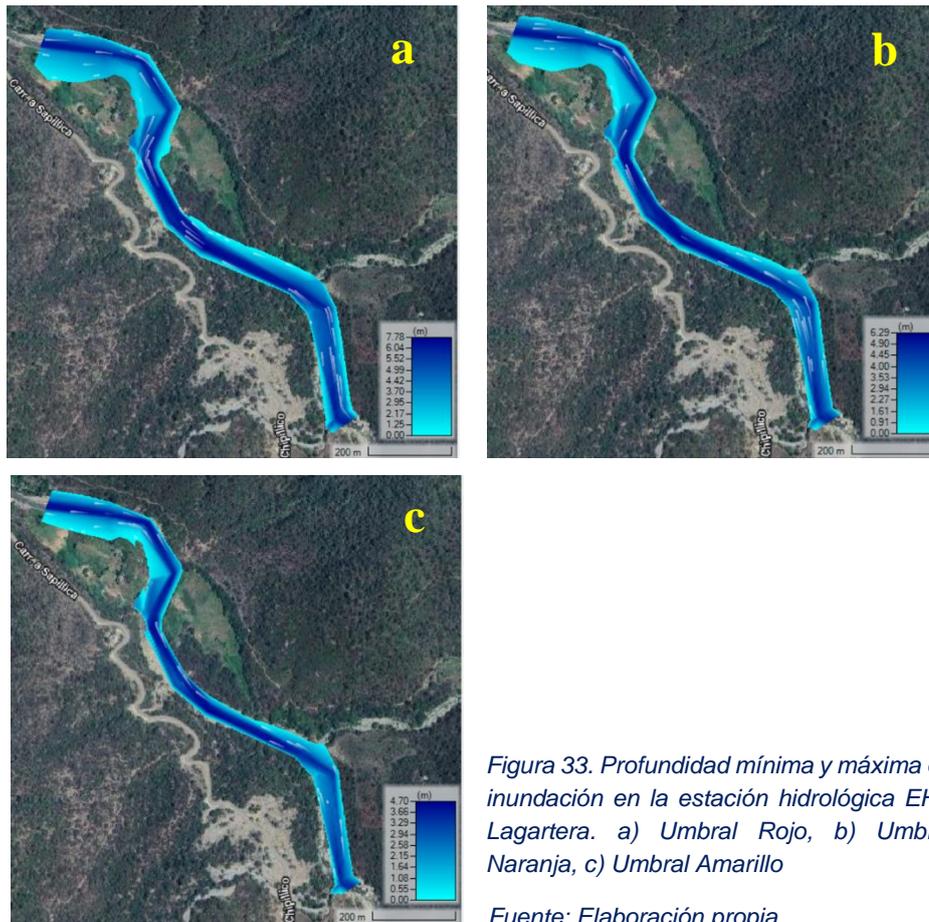


Figura 33. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Lagartera. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo

Fuente: Elaboración propia

Con estos parámetros establecidos, se generaron caudales máximos, como umbrales de inundaciones como se muestra en la **Tabla 9**, correspondientes a los niveles de rojo, naranja y amarillo respectivamente, como se muestra en **Figura 34**, también se generaron las velocidades máximas alcanzando los 2.53 m/s.

Tabla 9. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Lagartera

Caudal (m ³ /s)	Cota (m.s.n.m)	Regla limnimétrica (m)
439	446.03	6.39
267	444.52	4.88
131	442.92	3.28

Fuente: Elaboración propia

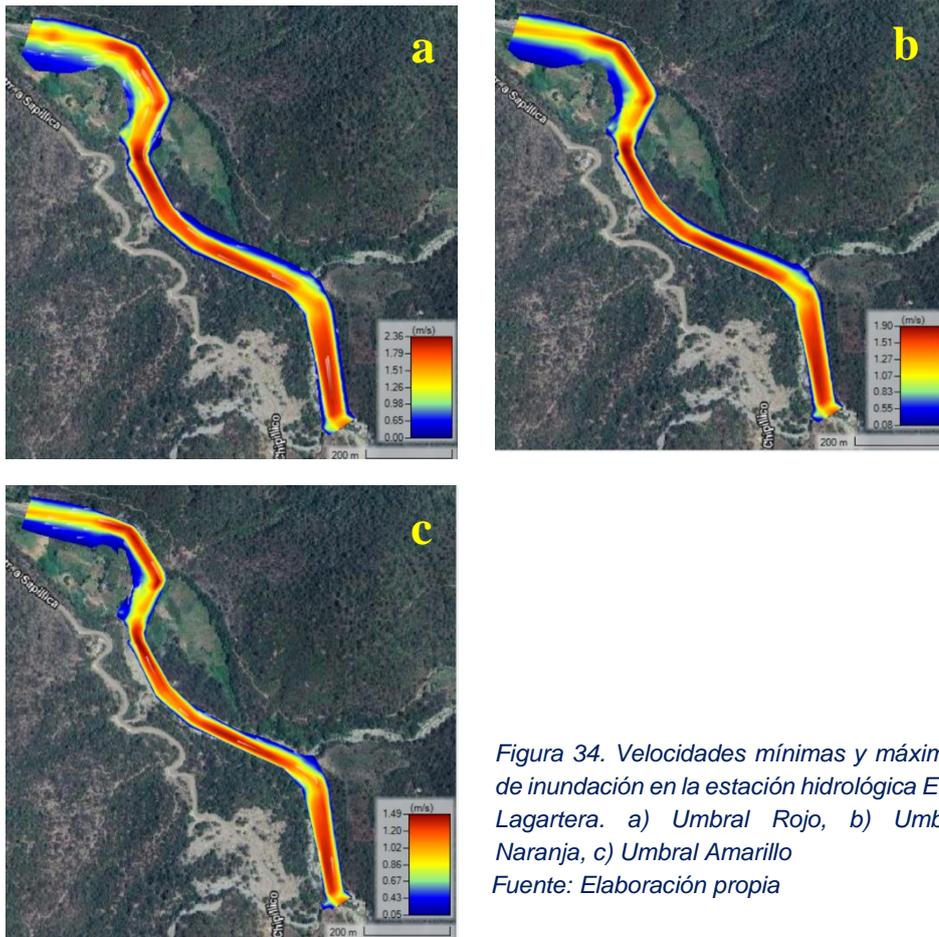


Figura 34. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Lagartera. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo
Fuente: Elaboración propia

Los umbrales estimados están sujetos a ajustes y calibración tomando como referencia aforos realizados por parte de la Dirección Zonal y la Dirección de Hidrología y huellas hídricas en la visita de campo.

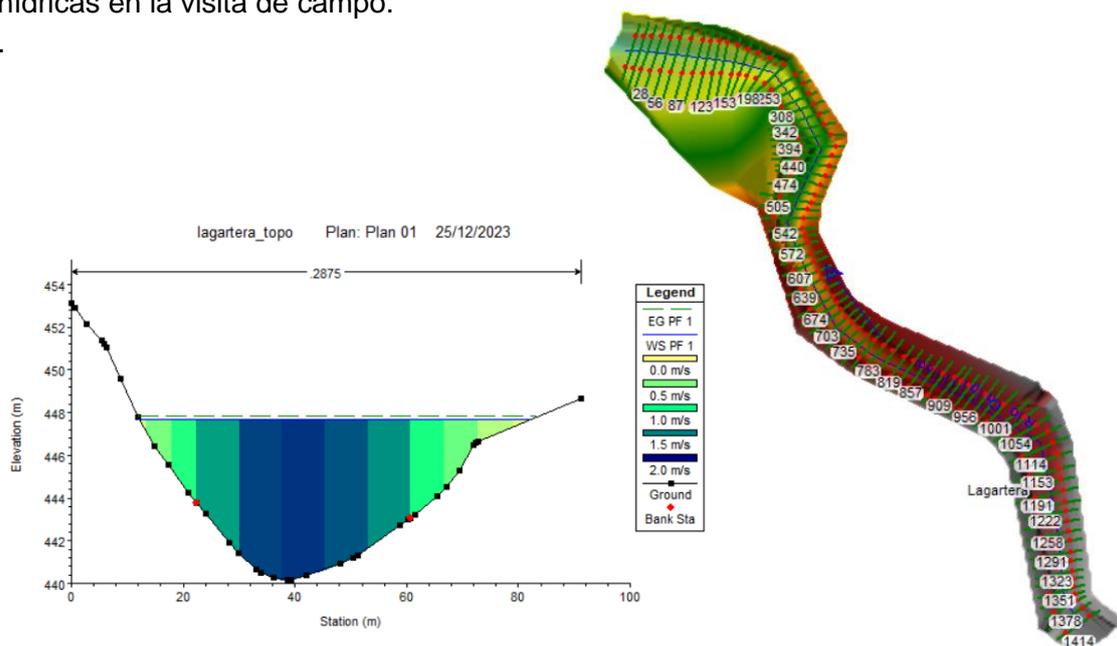


Figura 35. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnométrica en Lagartera.
Fuente: Elaboración propia

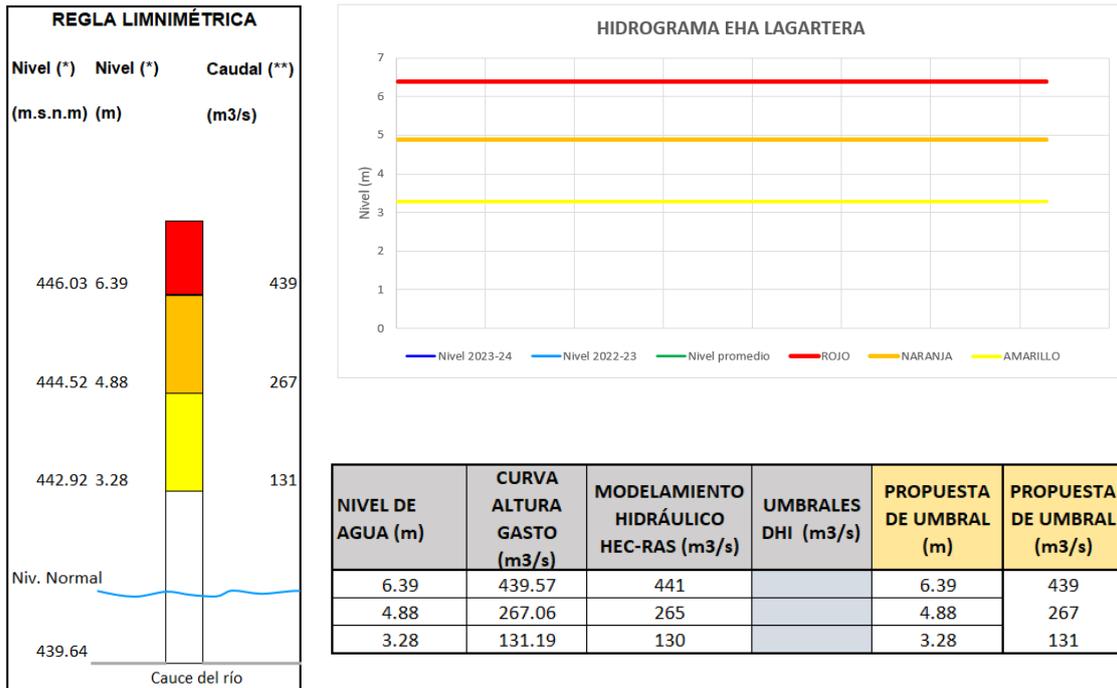


Figura 36. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Lagartera.

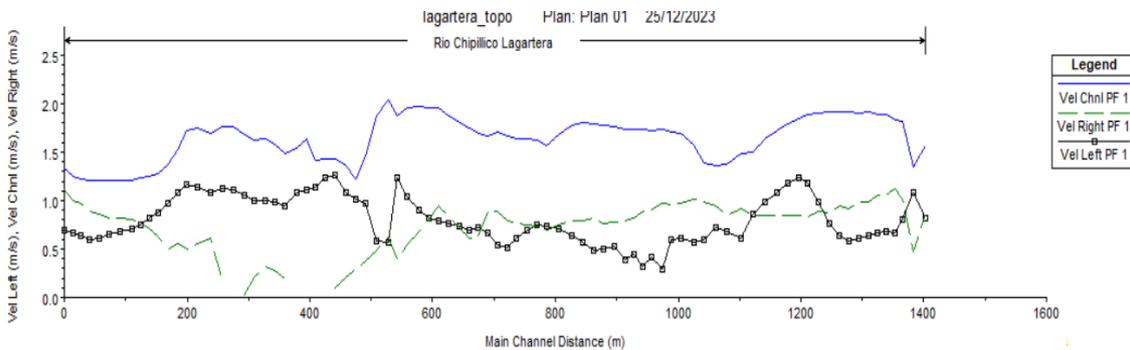


Figura 37. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Lagartera

4.7. Estación hidrológica EHA SÁNCHEZ CERRO

Se consideró la progresiva corresponde a la sección máximo nivel de aguas alcanzadas en el año 2017 (fuente: vigilante de la Estación Hidrológica Automática). Se consideró para el modelamiento hidráulico con HEC-RAS, los siguientes parámetros: una pendiente aguas arriba de 1.82% (0.0182 mm) y una pendiente aguas abajo de 2.31% (0.0231mm), rugosidad de 0.050, una cota del nivel de agua de 293.19 msnm, la cual corresponde a un tirante de 0.32 m y una cota del nivel máximo de 295.95 msnm, la cual corresponde a un tirante de 2.47 m (umbral rojo generado con datos del nivel máximo)

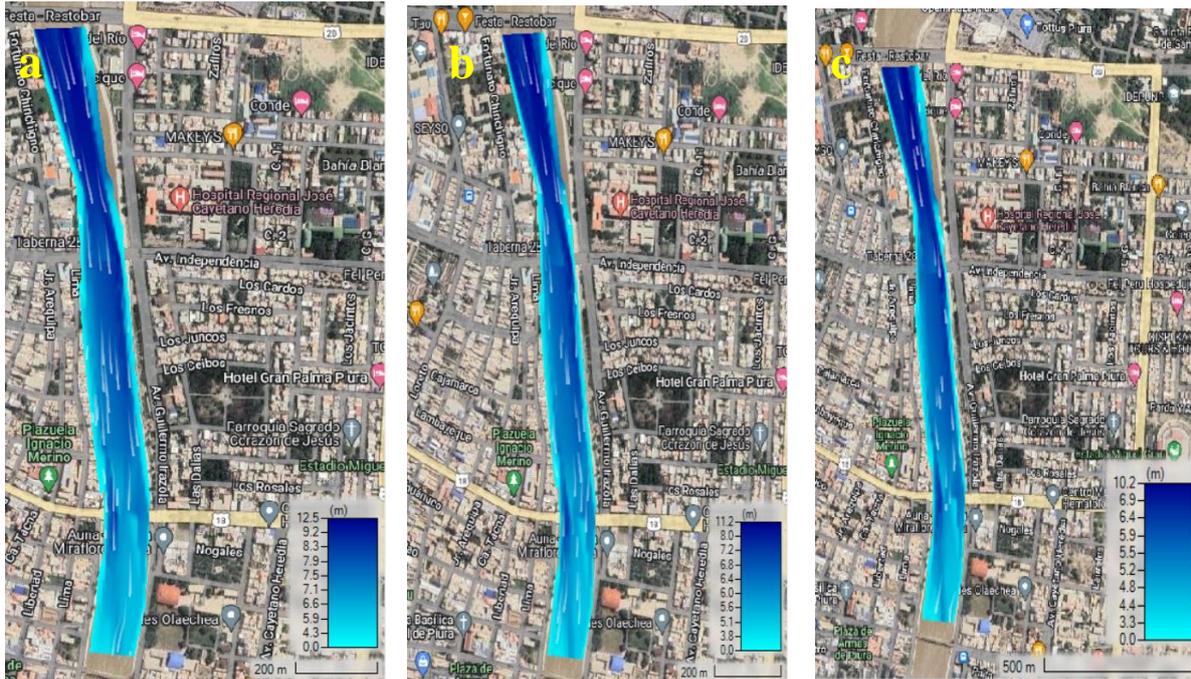


Figura 38. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Sánchez Cerro. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo

Fuente: Elaboración propia

Con estos parámetros establecidos, se generaron caudales máximos, como umbrales de inundaciones como se muestra en la **Tabla 10**, correspondientes a los niveles de rojo, naranja y amarillo respectivamente, como se muestra en **Figura 39**, también se generaron las velocidades máximas alcanzando los 3.16 m/s.

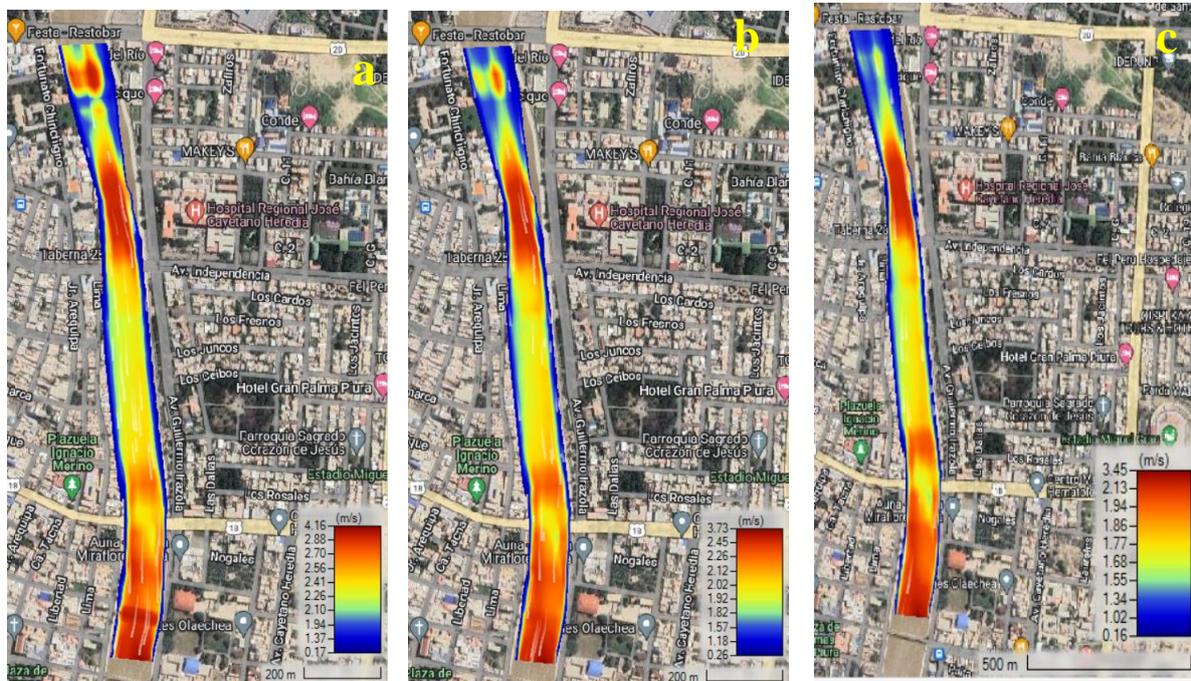


Figura 39. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Sánchez Cerro. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Sánchez Cerro

Caudal (m ³ /s)	Regla limnimétrica (m)
1800	6.2
1280	5
960	4

Fuente: Elaboración propia

Los umbrales estimados están sujetos a ajustes y calibración tomando como referencia aforos realizados por parte de la Dirección Zonal y la Dirección de Hidrología y huellas hídricas en la visita de campo.

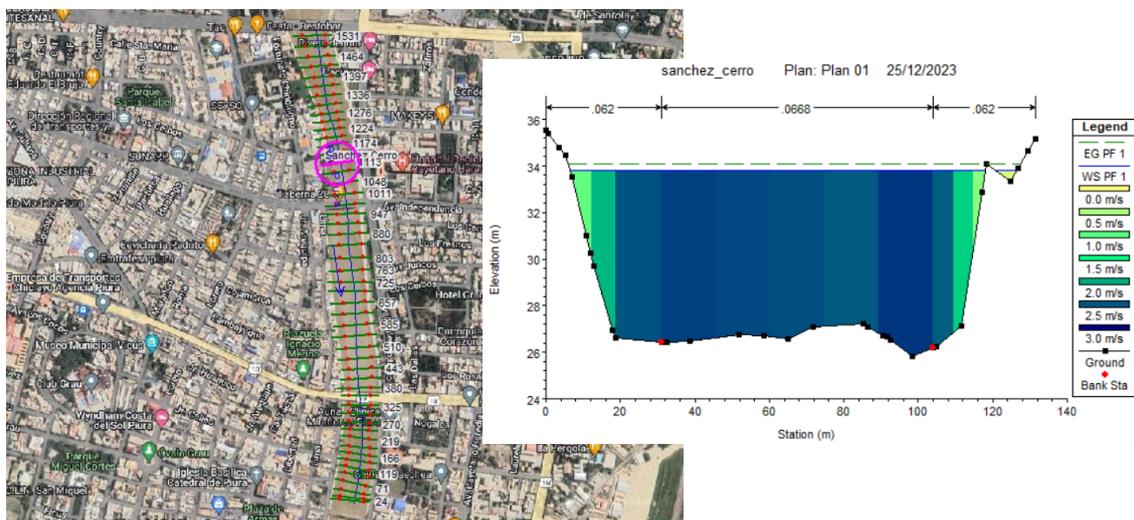
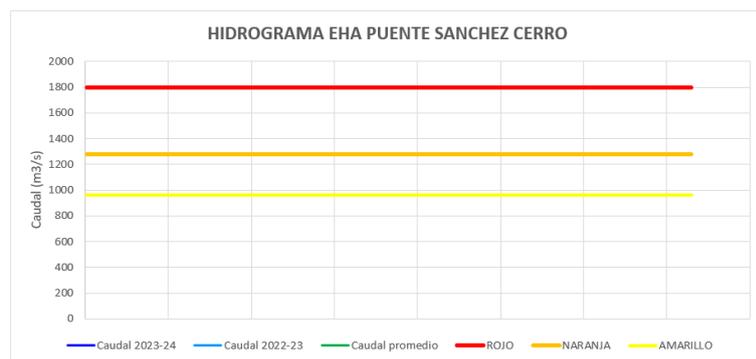
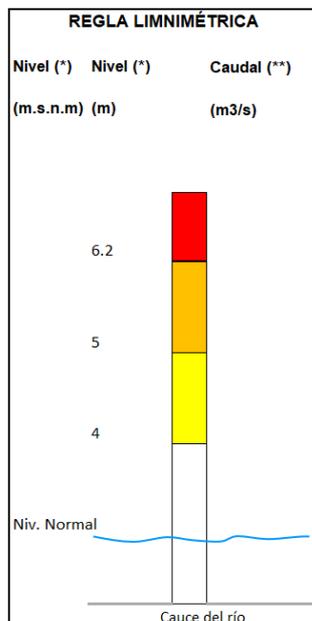


Figura 40. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en Sánchez Cerro

Fuente: Elaboración propia



NIVEL DE AGUA (m)	CURVA ALTURA GASTO (m ³ /s)	MODELAMIENTO HIDRÁULICO HEC-RAS (m ³ /s)	UMBRALES DHI (m ³ /s)	PROPUESTA DE UMBRAL (m ³ /s)
6.2	1808.69	1900	2000	1800
5	1282.32	1127	1600	1280
4	962.59		1100	960

Figura 41. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Sánchez Cerro

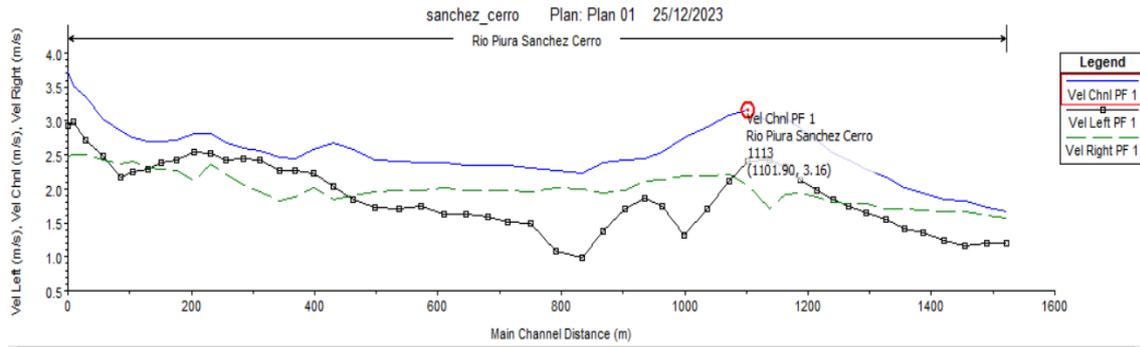


Figura 42. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Sánchez Cerro

4.8. Estación hidrológica EHA BOCATOMA CHIPILLICO

Se consideró la progresiva corresponde a la sección máximo nivel de aguas alcanzadas en el año 2017 (Fuente: vigilante de la Estación Hidrológica Automática). Se consideró para el modelamiento hidráulico con HEC-RAS, los siguientes parámetros: una pendiente aguas arriba de 0.16 % (0.0016mm) y una pendiente aguas abajo de 0.71 % (0.0071mm), rugosidad de 0.050, una cota del nivel de agua de 353.669 msnm, la cual corresponde.

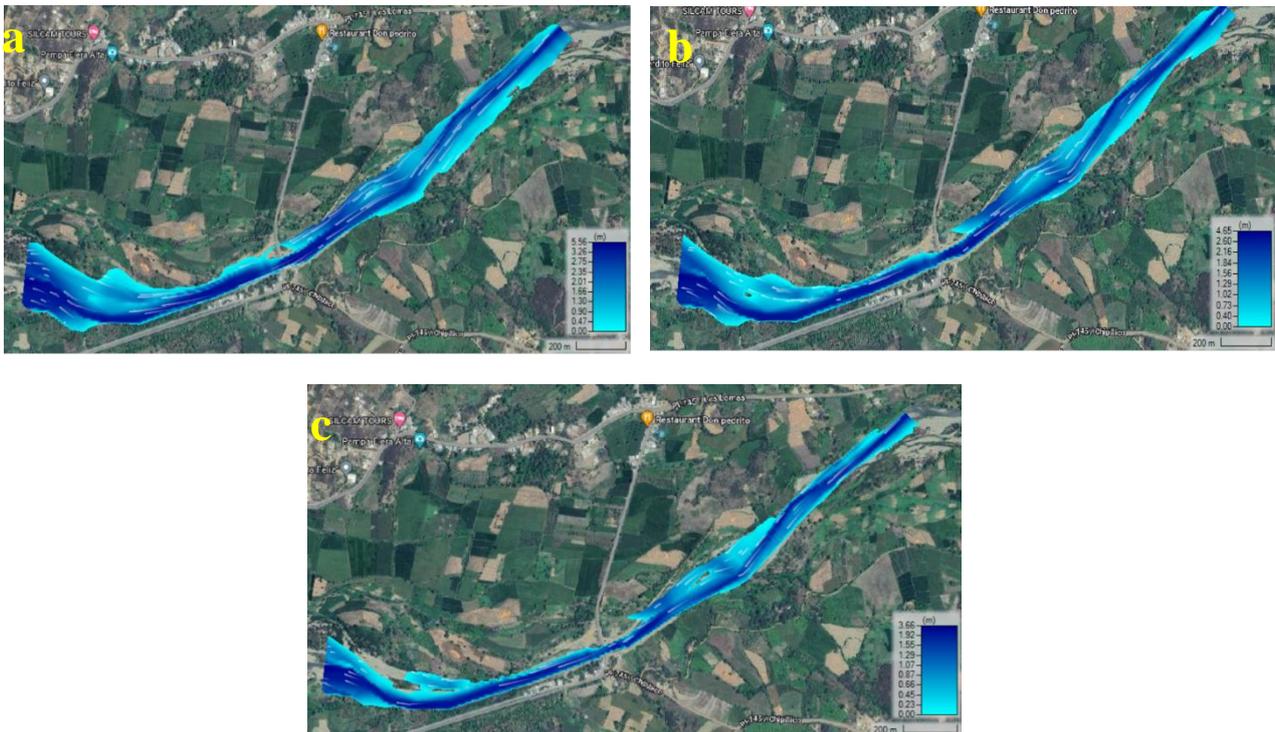


Figura 43. Profundidad mínima y máxima de inundación en la estación hidrológica EHA Bocatoma Chipillico. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo

Fuente: Elaboración propia

Con estos parámetros establecidos, se generaron caudales máximos, como umbrales de inundaciones como se muestra en la **Tabla 11**, correspondientes a los niveles de rojo, naranja y amarillo respectivamente, como se muestra en **Figura 44**, también se generaron las velocidades máximas alcanzando los 8.51 m/s.

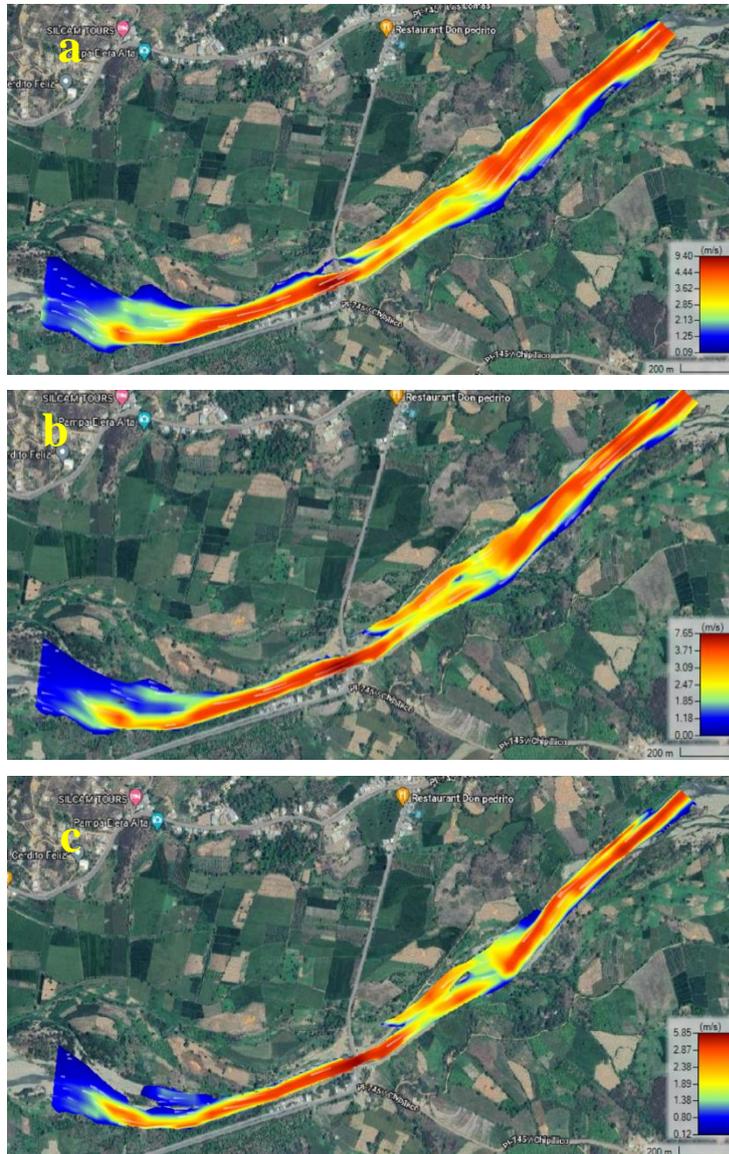


Figura 44. Velocidades mínimas y máximas de inundación en la estación hidrológica EHA Bocatoma Chipillico. a) Umbral Rojo, b) Umbral Naranja, c) Umbral Amarillo
Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Resumen de los umbrales de inundación en la EHA Bocatoma Chipillico

Caudal (m ³ /s)	Cota (m.s.n.m)	Regla limnimétrica (m)
820	342.08	5.028
466	340.51	3.458
203	339.34	2.288

Fuente: Elaboración propia

Los umbrales estimados están sujetos a ajustes y calibración tomando como referencia aforos realizados por parte de la Dirección Zonal y la Dirección de Hidrología y huellas hídricas en la visita de campo.

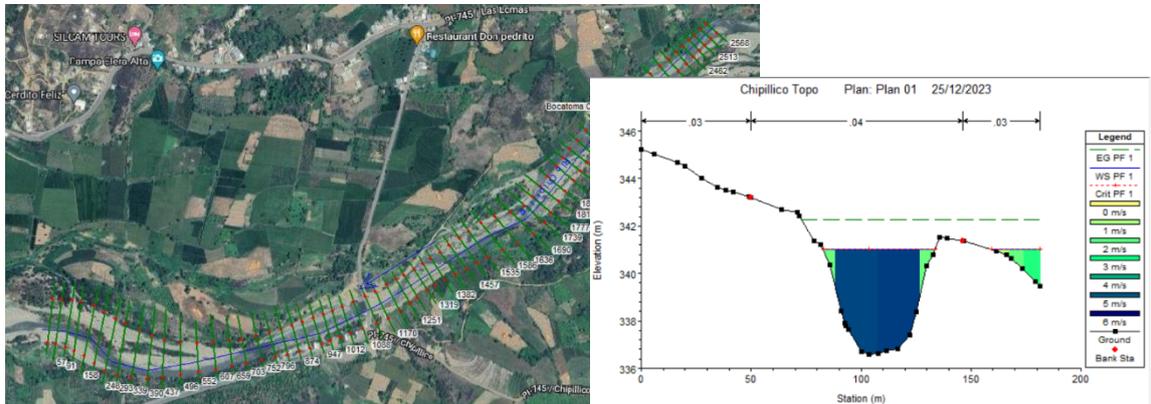


Figura 45. Sección transversal de velocidades a la altura de la regla limnimétrica en Bocotoma Chipillico
Fuente: Elaboración propia

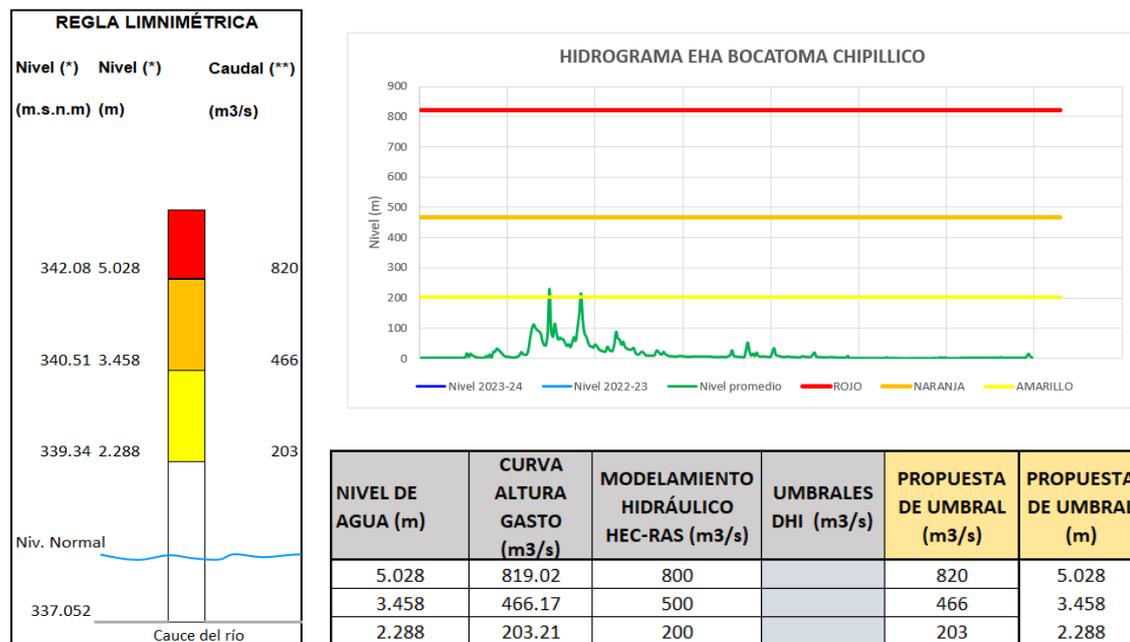


Figura 46. Ubicación de umbrales hidrológicos tomando como referencia la regla limnimétrica, igualmente se presenta los umbrales en comparación con los caudales disponibles en la estación hidrológicos EHA Bocotoma Chipillico

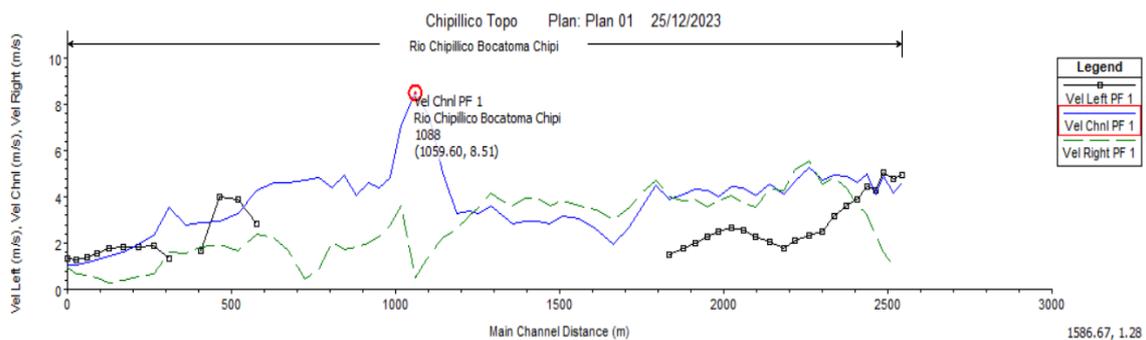


Figura 47. Perfil de velocidades longitudinal en la estación EHA Bocotoma Chipillico

V. CONCLUSIONES

Este trabajo ha permitido determinar los umbrales de inundación en las estaciones hidrológicas en la cuenca de los ríos Chira y Piura, mediante la utilización de datos topográficos, información de campo y modelamiento hidráulico, en ese sentido se presenta las siguientes conclusiones:

- Se propone una metodología robusta que contempla la recopilación de información hidrológica levantada en los meses de setiembre, octubre y noviembre del 2023, información satelital e información topográfica; complementada a través de un modelamiento hidráulico mediante el software HEC-RAS. A su vez se realiza la validación y calibración del modelo hidráulico mediante los niveles máximos alcanzados y aforos realizados en la sección de monitoreo.
- Se estimó los umbrales de inundación de las estaciones hidrológicas en las cuencas Chira y Piura, alcanzando magnitudes de hasta 1800 m³/s para el río Piura en el Puente Sánchez Cerro en su nivel rojo. Los umbrales estimados en el presente trabajo están sujetos a una continua evaluación y actualización para la temporada de lluvias 2023-2024, debido a los cambios en el cauce de los ríos por factores naturales y/o antrópicos.

Estación hidrológica EHA	Umbral de inundación (m ³ /s)		
	ROJO	NARANJA	AMARILLO
Tambogrande	1474	1138	570
Puente Nácara	1151	690	218
San Pedro	222	183	60
Corral del Medio	-	-	-
Hacienda Barrios	367	277	159
Salitral (*)	4.92	4.11	3.84
Bocatoma Chipillico	820	466	203
Lagartera (*)	6.39	4.88	3.28
Bocatoma La Zamba	-	-	-
Puente Sánchez Cerro	1800	1280	980

(*) Para las estaciones en mención se propone establecer los umbrales en niveles relativos.

- Los aforos realizados en cada una de las estaciones hidrométricas y verificación de la huella hídrica de los eventos de crecidas máximos ocurridos (2017 y 2023), fueron un insumo clave para la calibración de los parámetros hidráulicos que permitió validar los umbrales de inundación propuestos en el presente trabajo.

VI. RECOMENDACIONES

- Para un mayor detalle del cauce aguas abajo y/o aguas arriba se requiere ejecutar trabajos complementarios de levantamiento de información mediante equipos RPAS con el fin de obtener modelos de elevación digital (DEM) más precisos, igualmente el uso de equipos RPAS deberá de ser en lo preferible de tecnología tipo LIDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) para la recopilación de información más precisa en zonas donde existe población expuesta a crecidas.
- El uso de equipos hidrométricos es crucial al momento de definir o estimar secciones transversales del cauce del río, es por ello se recomienda uso de equipos hidrométricos de acuerdo a la característica del cauce referente a la velocidad y pendiente.
- La implementación de puntos geodésicos de orden “C” en cada estación es de suma importancia al momento de generar información de niveles absolutos con fines de modelamiento, igualmente se deberá de realizar la generación de por lo menos 2 puntos de orden “C” en cada estación hidrológica ante eventos de crecidas que pudieran desaparecer el punto georeferenciado.
- Actualizar regularmente los datos hidrológicos y topográficos para mejorar la precisión de las estimaciones.
- Realizar evaluaciones periódicas de los umbrales de inundación en las áreas identificadas como críticas.
- Desarrollar un plan de gestión de inundaciones que incorpore los umbrales de inundaciones determinados en este estudio.
- Educar a la comunidad sobre los riesgos de inundaciones y las medidas de seguridad.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Amir Mohammad Arash, Kirstie Fryirs, Timothy J. Ralph, (2023). *Detection of decadal time-series changes in flow hydrology in eastern Australia: Considerations for river recovery and flood management.*

Alfieri, Lorenzo; Zsoter, Ervin; Harrigan, Shaun; Hirpa, Feyera A.; Lavaysse Christophe; Prudhomme Christel y Salamon Peter. (2019). *Range-dependent thresholds for global flood early warning – ScienceDirect.*

Reder Carlos Gargate Lugo, (2023). *Determinación de umbrales de inundación en las estaciones hidrológicas de la DZ1.*

Yanho Song, Yoonkyung Park, Jungo Lee, Moojong Parl and Youngseok Song. (2019). *Flood Forecasting and Warning System Structures: Procedure and Application to a Small Urban Stream in South Korea. Water 2019, 11(8), 1571; <https://doi.org/10.3390/w11081571>*

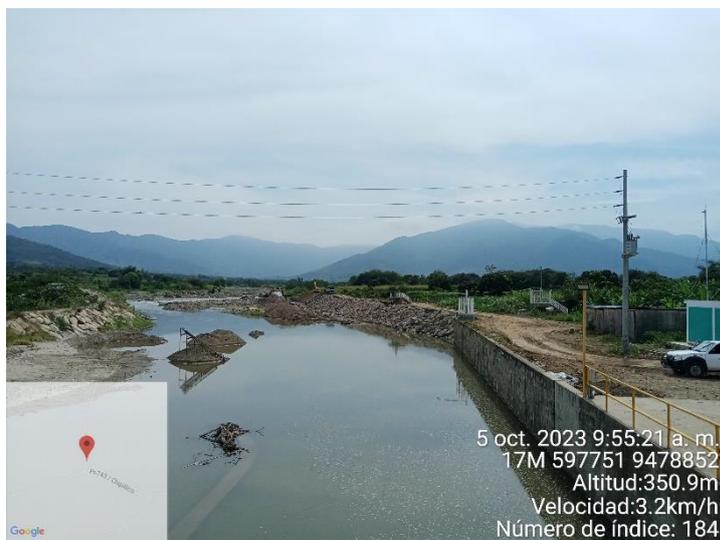
Erazo Adriana María (2017). *Hydrological tools for flood early warning systems. XVI World Water Congress. International Water Resources association –IWRA.*

VIII. PANEL FOTOGRÁFICO

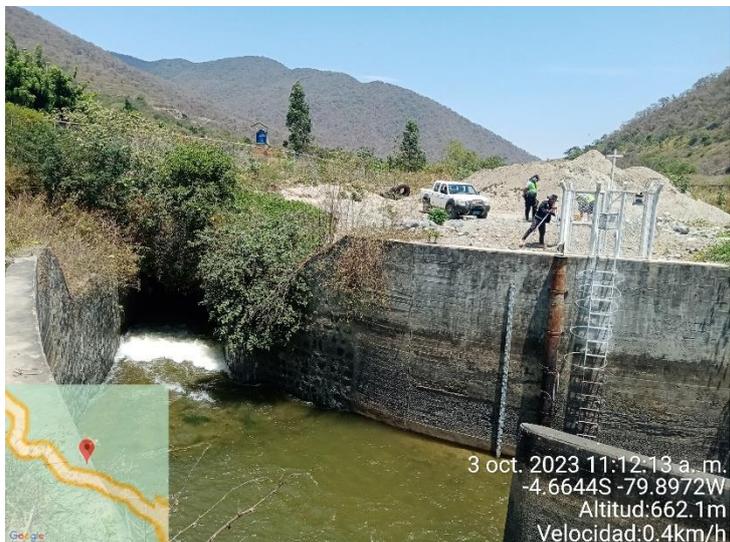
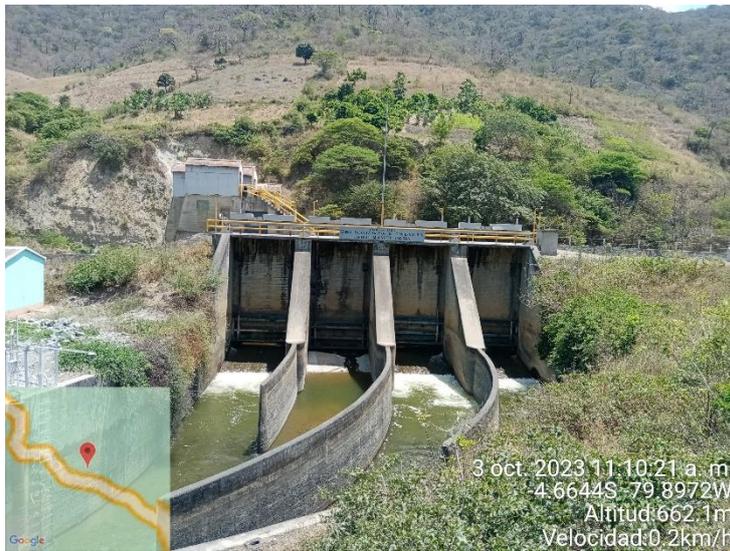
- Estación hidrológica Tambogrande



- Estación hidrológica Bocatoma Chipillico



- Estación hidrológica Bocatoma La Zamba



- Estación hidrológica Puente Ñácara



- Estación hidrológica San Pedro



- Estación hidrológica Corral del Medio



- Estación hidrológica Hacienda Barrios



- Estación hidrológica Salitral

