UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:

Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho - 2025

Para optar el título profesional de:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. Jonathan ESPINO CANCHARI

ASESOR:

Msc. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANÍ

AYACUCHO - PERÚ

2026

RESUMEN

La presente investigación tuvo por objetivo evaluar el comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico de su cuenca y la modelación numérica con elementos finitos, en la región Ayacucho. El estudio fue de enfoque cuantitativo y diseño no experimental. Primero se delimitó la cuenca y se calcularon sus parámetros morfométricos en un entorno SIG, a partir de modelos digitales de elevación SRTM (30 m) y ALOS PALSAR (12.5 m). Luego se estimaron los caudales de diseño mediante un análisis de frecuencia con la distribución Log-Pearson tipo III y una modelación hidrológica distribuida en HEC-HMS. Finalmente, el flujo se simuló con el modelo bidimensional de elementos finitos TELEMAC-2D, sobre una malla de 30 348 nodos, para seis periodos de retorno (25 a 500 años), y los resultados se verificaron en campo. La cuenca delimitada abarca 1 129.77 km^2, y los caudales de diseño obtenidos variaron entre 193 y 753 m^3/s para los diferentes periodos de retorno. El flujo resultó predominantemente subcrítico y, por las características geomorfológicas del valle, el aumento del caudal se reflejó en un mayor tirante y no en una expansión apreciable de la inundación. Los resultados coincidieron con las fichas de la Autoridad Nacional del Agua y permitieron predimensionar una defensa de gaviones. Se concluye que la combinación del análisis morfométrico y la modelación con elementos finitos evaluó confiablemente el comportamiento hidráulico del río y aportó una base técnica para la gestión del riesgo por inundación.

Palabras clave: Comportamiento hidráulico; análisis morfométrico; modelación numérica; elementos finitos; TELEMAC-2D; río Pongora; inundación; periodo de retorno; defensa ribereña.

SUMMARY

The objective of this research was to evaluate the hydraulic behavior of the Pongora River based on the morphometric analysis of its watershed and numerical modeling with finite elements, in the Ayacucho region. The study, of a quantitative approach and non-experimental design, was carried out in linked stages. First, the watershed was delineated and its morphometric parameters were calculated in a GIS environment, using SRTM 30 m and ALOS PALSAR 12.5 m digital elevation models. Then, the design discharges were estimated through a frequency analysis with the Log-Pearson type III distribution and a distributed hydrological modeling in HEC-HMS. Finally, the flow was simulated with the two-dimensional TELEMAC-2D model, on a finite element mesh of 30 348 nodes, for six return periods (25 to 500 years), and the results were verified in the field with georeferenced records. The delineated watershed covers 1 129.77 km^2, and the design discharges obtained ranged between 193 and 753 m^3/s for the different return periods. The flow was predominantly subcritical and, due to the canyon shape of the valley, the increase in discharge was reflected in greater flow depth rather than in an appreciable expansion of the flooded area. The results agreed with the records of the National Water Authority and allowed the preliminary sizing of a gabion riverbank defense. It is concluded that the combination of morphometric analysis and finite element modeling reliably evaluated the hydraulic behavior of the river and provided a technical basis for flood risk management.

Keywords: Hydraulic behavior; morphometric analysis; numerical modeling; finite elements; TELEMAC-2D; Pongora River; flooding; return period; riverbank defense.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones fluviales constituyen uno de los peligros naturales de mayor recurrencia e impacto en las cuencas andinas del Perú. La combinación de pendientes pronunciadas, precipitaciones intensas de corta duración y una ocupación creciente de las márgenes de los ríos configura un escenario de riesgo permanente para las poblaciones y los terrenos agrícolas ribereños. En este contexto, el río Pongora, ubicado en la región Ayacucho, desborda de forma recurrente y ha sido identificado por las autoridades competentes como un punto crítico de peligro, lo que compromete viviendas, cultivos e infraestructura a lo largo de su cauce.

La evaluación del comportamiento hidráulico de un río andino exige un enfoque que articule dos componentes complementarios. Por un lado, el análisis morfométrico de la cuenca permite caracterizar sus propiedades físicas, como la forma, el relieve y la red de drenaje, que gobiernan la manera en que la precipitación se transforma en escorrentía y determinan la magnitud de los caudales máximos. Por otro lado, la modelación numérica traduce esos caudales en las variables que describen el flujo, como el tirante, la velocidad y la peligrosidad, y genera los mapas de inundación que sustentan la gestión del riesgo. Ambos componentes no son enfoques independientes, sino eslabones de una misma cadena metodológica que va de la caracterización de la cuenca a la simulación del comportamiento del agua.

La práctica de la modelación hidráulica bidimensional en el Perú se apoya casi exclusivamente en programas basados en el método de volúmenes finitos, mientras que el método de elementos finitos permanece inexplorado en la modelación de inundaciones fluviales de ríos peruanos. El método de elementos finitos ofrece ventajas para la representación de las geometrías fluviales complejas propias de los cauces, mediante mallas no estructuradas que se adaptan a los contornos irregulares del terreno y permiten el refinamiento local de las zonas de mayor interés. Esta ventaja técnica, sumada a la ausencia de estudios que la apliquen en el contexto nacional, motiva la elección del enfoque adoptado en la presente investigación.

La motivación de este trabajo se sustenta en la necesidad de aportar una evaluación rigurosa del comportamiento hidráulico del río Pongora que integre, por primera vez de forma documentada, el análisis morfométrico de su cuenca con la modelación numérica por elementos finitos. Los estudios previos desarrollados sobre el mismo río abordaron el problema con enfoques unidimensionales, bidimensionales de volúmenes finitos o de evaluación de riesgo, pero ninguno empleó el método de elementos finitos acoplado a la caracterización morfométrica de la cuenca. La presente investigación busca cubrir ese vacío y ofrecer una herramienta técnica que contribuya a la prevención de riesgos y a la gestión del recurso hídrico en la zona.

El trabajo de investigación se encuentra organizado de la siguiente manera:

1. **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**
    - Se formula el problema de investigación analizando la situación de las inundaciones fluviales a escala mundial, regional y nacional, la condición de amenaza del río Pongora en la región Ayacucho, y el vacío metodológico que representa la ausencia de modelación por elementos finitos acoplada al análisis morfométrico en ríos peruanos. Se establece la delimitación espacial (la cuenca del río Pongora), temporal y la unidad de análisis (el comportamiento hidráulico del cauce bajo distintos periodos de retorno).
2. **MARCO TEÓRICO**
    - Se presentan los antecedentes internacionales y nacionales sobre morfometría de cuencas, modelación hidráulica bidimensional y aplicación del método de elementos finitos. Se desarrollan las bases teóricas de la hidráulica fluvial, las ecuaciones de Saint-Venant, la propagación de crecidas y la gestión del riesgo por inundación, así como el marco conceptual de las herramientas y métodos empleados en la investigación.
3. **MARCO METODOLÓGICO**
    - Se detalla la metodología de la investigación, la descripción del área de estudio, la población y la muestra, las hipótesis y la operacionalización de las variables. Se describe el procedimiento completo: la delimitación de la cuenca, el cálculo de los parámetros morfométricos, el análisis de frecuencia de caudales, la modelación hidrológica, la construcción de la malla de elementos finitos y la simulación del flujo con el modelo TELEMAC-2D.
4. **RESULTADOS**
    - Se presentan los parámetros morfométricos de la cuenca validados contra el estudio oficial de referencia, los caudales de diseño para los distintos periodos de retorno, y los resultados de la modelación hidráulica en términos de tirante, velocidad y número de Froude. Se exponen los mapas de inundación y de peligrosidad, y se contrastan los resultados con las hipótesis de la investigación.
5. **CONCLUSIONES**
    - Se presentan las conclusiones en relación con los cinco objetivos específicos, las recomendaciones derivadas del estudio, las limitaciones identificadas y las sugerencias para futuras líneas de investigación, incluyendo la incorporación de un levantamiento topográfico de detalle y la calibración del modelo con datos de aforo medidos.

A mi padre, allá en el cielo, a mi madre, mi mayor tesoro, a mis hermanos mis más grandes aliados y de manera especial a mi esposa, el amor de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi gratitud a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. La formación recibida de sus docentes, sostenida en el rigor técnico y la vocación de enseñanza, constituyó el fundamento sobre el cual pude emprender esta investigación.

Dejo constancia de mi reconocimiento al Mg. Ing. Alex Sander Ircañaupa Huamani, asesor de la presente tesis, por la orientación permanente y el criterio con que guió cada etapa del trabajo. Su exigencia académica y su disposición para revisar los avances resultaron determinantes para alcanzar la solidez metodológica que la investigación requería.

Agradezco a los miembros del jurado evaluador, Mg. Ing. Edward León Palacios y Mg. Ing. Jaime Leonardo Bendezú Prado, por la atención dedicada a la revisión de este documento. Sus observaciones y sugerencias contribuyeron a precisar el enfoque y a mejorar la calidad del contenido final.

Hago extensivo mi agradecimiento a las instituciones que facilitaron el acceso a la información hidrológica e hidráulica de la cuenca del río Pongora. Los datos de las estaciones meteorológicas y los estudios técnicos previos fueron insumos indispensables para el desarrollo de la modelación numérica.

A mis compañeros de estudios, por el aprendizaje compartido y el respaldo mutuo que acompañó las largas jornadas de trabajo, mi sincero aprecio.

Finalmente, a mi familia, por su paciencia y su apoyo constante a lo largo de todo este proceso, y a cuantos, de una u otra manera, hicieron posible la culminación de esta meta.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL VIII

LISTA DE FIGURAS XII

LISTA DE CUADROS XIV

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1

1.1 Descripción del problema . . . 1
1.1.1 A nivel mundial . . . 1
1.1.2 A nivel de Latinoamérica . . . 1
1.1.3 A nivel nacional . . . 2
1.1.4 A nivel regional . . . 3
1.1.5 Brecha de conocimiento . . . 3
1.2 Delimitación del problema . . . 4
1.2.1 Delimitación espacial . . . 4
1.2.2 Delimitación temporal . . . 4
1.2.3 Temática y unidad de análisis . . . 4
1.3 Formulación del problema . . . 6
1.3.1 Problema general . . . 6
1.3.2 Problemas específicos . . . 6
1.4 Justificación e importancia . . . 6
1.5 Limitaciones de la investigación . . . 8
1.6 Objetivos de la investigación . . . 10
1.6.1 Objetivo general . . . 10
1.6.2 Objetivos específicos . . . 10

2 MARCO TEÓRICO 11

2.1 Antecedentes . . . 11
2.1.1 Investigaciones internacionales:Artículos científicos . . . 11
2.1.2 Investigaciones nacionales y latinoamericanas . . . 21
2.2 Bases teóricas . . . 28
2.2.1 Flujo en canales abiertos . . . 28
2.2.2 Ecuación de Manning y coeficiente de rugosidad . . . 30
2.2.3 Flujo gradualmente variado . . . 31
2.2.4 Ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales . . . 31
2.2.5 Parámetros del comportamiento hidráulico . . . 33
2.2.6 Propagación de crecidas en ríos . . . 34
2.2.7 Gestión del riesgo por inundación . . . 35
2.2.8 Relación entre la morfometría de la cuenca y el comportamiento hidráulico . . . 37

2.3 Marco conceptual 39
2.3.1 Morfometría de cuencas hidrográficas 39
2.3.2 Parámetros de forma 39
2.3.3 Parámetros de relieve. 39
2.3.4 Red de drenaje y orden de corriente 40
2.3.5 Densidad de drenaje 40
2.3.6 Tiempo de concentración 41
2.3.7 Modelo digital de elevación 41
2.3.8 Periodo de retorno 42
2.3.9 Análisis de frecuencia de caudales 42
2.3.10 Curvas de intensidad-duración-frecuencia 42
2.3.11 Método del número de curva 43
2.3.12 Hidrograma unitario 43
2.3.13 Caudal de diseño 43
2.3.14 Modelación numérica 43
2.3.15 Método de elementos finitos 44
2.3.16 Método de volúmenes finitos. 44
2.3.17 Malla de discretización 45
2.3.18 Condiciones de contorno 45
2.3.19 Calibración y validación 45
2.3.20 Sistemas de información geográfica 45
2.3.21 ArcGIS Pro 46
2.3.22 QGIS. 46
2.3.23 HEC-HMS 46
2.3.24 HEC-RAS 46
2.3.25 TELEMAC-2D. 47
2.3.26 Blue Kenue 47

3 MARCO METODOLÓGICO 48
3.1 Método 48
3.2 Orientación 48
3.3 Enfoque. 49
3.4 Instrumento de recolección de datos 49
3.5 Tipo o alcance de la investigación 50
3.6 Nivel de investigación 50
3.7 Diseño de investigación 51
3.7.1 Propósito de la investigación. 51
3.7.2 Número de mediciones 51
3.7.3 Cronología de las observaciones 52
3.8 Población y muestra. 52
3.8.1 Población 52

3.8.2 Muestra . . . 52
3.8.3 Tipo de muestreo . . . 53
3.9 Hipótesis . . . 53
3.9.1 Hipótesis general . . . 53
3.9.2 Hipótesis específicas . . . 54
3.10 Operacionalización de variables . . . 54
3.10.1 Variables . . . 54
3.10.2 Dimensiones . . . 54
3.10.3 Indicadores . . . 55
3.11 Técnicas e instrumentos . . . 57
3.11.1 Técnicas de investigación . . . 57
3.11.2 Instrumentos de investigación . . . 58
3.11.3 Herramientas de software utilizadas . . . 59
3.12 Desarrollo del trabajo de tesis. . . . 61
3.12.1 Recopilación de la información base. . . . 61
3.12.2 Delimitación de la cuenca . . . 64
3.12.3 Parámetros morfométricos. . . . 67
3.12.4 Análisis hidrológico . . . 69
3.12.5 Modelación hidrológica . . . 75
3.12.6 Generación de la malla de elementos finitos . . . 81
3.12.7 Configuración y simulación con TELEMAC-2D. . . . 87
3.12.8 Resultados de la modelación hidráulica . . . 90
3.12.9 Verificación de campo . . . 97
3.12.10 Identificación de zonas de peligro . . . 102
3.12.11 Lineamientos técnicos y predimensionamiento de la defensa ribereña . 106

4 RESULTADOS 112

4.1 Análisis de resultados . . . 112
4.1.1 Sobre la validación de la caracterización de la cuenca. . . . 112
4.1.2 Sobre los caudales de diseño . . . 113
4.1.3 Sobre el comportamiento del flujo y la forma del valle . . . 113
4.1.4 Sobre la distribución del peligro entre las márgenes . . . 114
4.1.5 Sobre la coincidencia con las intervenciones oficiales y la verificación de campo . . . 115
4.1.6 Sobre la propuesta de defensa . . . 116
4.1.7 Sobre los alcances y las limitaciones . . . 117
4.2 Contrastación de hipótesis . . . 118
4.2.1 Contrastación de hipótesis específica 01 . . . 118
4.2.2 Contrastación de hipótesis específica 02 . . . 120
4.2.3 Contrastación de hipótesis específica 03 . . . 121
4.2.4 Contrastación de hipótesis específica 04 . . . 122

4.2.5 Contrastación de hipótesis específica 05 123

5 CONCLUSIONES **124**

5.1 Conclusiones de la investigación 124

5.1.1 Conclusión 01 124

5.1.2 Conclusión 02 125

5.1.3 Conclusión 03 126

5.1.4 Conclusión 04 127

5.1.5 Conclusión 05 128

5.1.6 Conclusión general 129

5.2 Recomendaciones 130

5.3 Trabajos futuros 131

Anexo: Panel fotográfico de la visita de campo 132

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **134**

Anexo 1: Matriz de consistencia 144

Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables 146

LISTA DE FIGURAS

1 Evolución cronológica de las investigaciones sobre modelación hidrológica e hidráulica de inundaciones fluviales 21
2 Evolución cronológica de investigaciones nacionales sobre modelación de inundaciones fluviales 27
3 Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos 29
4 Discretización en volúmenes finitos de las ecuaciones de Saint-Venant 32
5 Cálculo del caudal en una sección a partir del tirante, el ancho y la velocidad del flujo 33
6 Caracterización geoespacial de una cuenca urbana propensa a inundaciones e imágenes de eventos recientes, Kumasi (Ghana) 36
7 Ubicación y modelo de elevación de la cuenca alta del río Páez (Costa Rica) . . . 38
8 Cálculo automático de parámetros morfométricos de una cuenca: Modelo de elevación y curva hipsométrica 40
9 Modelo digital de elevación 3D e identificación de aparatos volcánicos principales de la cuenca alta del río Chaschuil (Argentina) 42
10 Visualización del campo de tirante sobre la malla de cálculo en Blue Kenue . . . 44
11 Ubicación del punto de aforo del río Pongora 64
12 Capas base y red hídrica oficial de referencia (ANA e IGN) 64
13 Corrección del modelo digital de elevación mediante *Fill* 65
14 Dirección de flujo (*Flow Direction*, método D8) 65
15 Acumulación de flujo (*Flow Accumulation*) 66
16 Definición del punto de aforo (583 827 E; 8 553 291 N) 66
17 Cuenca del río Pongora delimitada 67
18 Ajuste de la distribución Log-Pearson tipo III en las seis estaciones 70
19 Polígonos de Thiessen recortados a la cuenca del río Pongora 72
20 Curvas intensidad–duración–frecuencia (método de Dick y Peschke) 73
21 Hietogramas de diseño por periodo de retorno (método del bloque alterno) . . 75
22 Creación del proyecto en HEC-HMS 4.13 76
23 Hietogramas de diseño ingresados por periodo de retorno 76
24 Hidrograma de salida del modelo(corrida de 100 años) 77
25 Esquema del modelo distribuido: 26 subcuencas y tránsitos de Muskingum . . . 78
26 Modelo digital de elevación ALOS PALSAR de 12.5 m del tramo del río Pongora . 81
27 Alternativas de dominio computacional orientadas según el eje del valle 83
28 Dominio computacional “Opción B” y fronteras líquidas del modelo 84
29 Malla de elementos finitos y condiciones de contorno asignadas 85
30 Detalle de la triangulación de la malla sobre el tramo del cauce 85
31 Campo de batimetría interpolado sobre la malla 86
32 Verificación de la malla con la batimetría en Blue Kenue 86
33 Campo de tirante de agua para el periodo de retorno de 140 años 92
34 Mancha de inundación para el periodo de retorno de 500 años 92

35 Mancha de inundación para el periodo de retorno de 25 años 93
36 Mancha de inundación para el periodo de retorno de 140 años 94
37 Mancha de inundación para el periodo de retorno de 500 años 94
38 Perfil longitudinal de la superficie libre (periodos de 140 y 500 años) 97
39 Puntos de verificación sobre la mancha de inundación de 500 años 98
40 Puntos prioritarios de verificación según nivel de criticidad 98
41 Parcelas de cultivo en la margen del río, con el puente proyectado al fondo . . . 99
42 Medición del ancho del cauce en la sección de aforo 99
43 Vivienda emplazada en zona ribereña expuesta 100
44 Muro de gaviones existente en el tramo de aguas abajo 100
45 Zona del puente proyectado 102
46 Zona con presencia de viviendas 103
47 Zona agrícola con parcelas de cultivo sobre la margen inundable 103
48 Zona de la confluencia con el tributario 104
49 Elementos expuestos en el sector del punto de control 21 105
50 Defensa existente frente a las intervenciones propuestas por la ANA 107
51 Secciones tipo de la defensa de gaviones por subtramo 109
52 Alineamiento en planta de la defensa ribereña propuesta 110
53 Reconocimiento del sector del puente proyectado y de la sección de aforo . . . 132
54 Elementos expuestos en la margen izquierda del tramo del puente 132
55 Defensa de gaviones existente en el tramo de aguas abajo 133
56 Detalle y estado de conservación del muro de gaviones existente 133

LISTA DE CUADROS

1 Antecedentes internacionales sobre modelación de inundaciones 17
2 Antecedentes nacionales sobre modelación de inundaciones 25
3 Clasificación del flujo en canales abiertos. 29
4 Valores del coeficiente de rugosidad de Manning según el tipo de cobertura del cauce y la llanura de inundación. 31
5 Parámetros morfométricos de forma y su interpretación hidrológica. 39
6 Fórmulas de estimación del tiempo de concentración. 41
7 Muestra de estaciones pluviométricas 53
8 Herramientas de software utilizadas en el desarrollo del análisis morfométrico y la modelación hidrológica e hidráulica del río Pongora 59
9 Estaciones pluviométricas empleadas 62
10 Capas vectoriales empleadas 63
11 Parámetros morfométricos de la cuenca del río Pongora 68
12 Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov 69
13 Precipitaciones máximas en 24 horas de diseño 70
14 Pesos de Thiessen de las estaciones 72
15 Intensidades de diseño a 60 minutos 74
16 Números de curva por subcuenca 79
17 Caudales de diseño por periodo de retorno 80
18 Vértices del dominio computacional 82
19 Indicadores de calidad de la malla 87
20 Parámetros de configuración de TELEMAC-2D 89
21 Condiciones de contorno por periodo de retorno 89
22 Sensibilidad del área inundada al umbral de tirante 91
23 Resultados hidráulicos por periodo de retorno 91
24 Variables hidráulicas en los puntos de control 96
25 Puntos verificados en campo 101
26 Distribución de la inundación por márgenes 104
27 Predimensionamiento hidráulico de la defensa 109
28 Validación de los parámetros morfométricos 112
29 Caudales de diseño por periodo de retorno 113
30 Respuesta del tramo al aumento del caudal 114
31 Contraste entre la modelación y la información oficial 116
32 Parámetros morfométricos y su influencia en la dinámica de la cuenca 118
33 Respuesta del modelo en los seis escenarios de caudal 120
34 Comprobaciones que respaldan la validez del modelo 121
35 Correspondencia entre los rasgos físicos y el flujo simulado 122
36 Predimensionamiento de la defensa derivado de los resultados 123
37 Matriz de consistencia 145
38 Matriz de operacionalización de variables 146

GLOSARIO

ALOS PALSAR	Advanced Land Observing Satellite – Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar, sensor de radar que provee modelos digitales de elevación de 12.5 m de resolución, empleado para la generación de la malla del tramo modelado.
ANA	Autoridad Nacional del Agua, ente rector del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos del Perú, encargado de la delimitación de fajas marginales.
Blue Kenue	Preprocesador desarrollado por el National Research Council de Canadá, empleado para la generación y edición de la malla de elementos finitos y las condiciones de contorno de TELEMAC-2D.
CENEPRED	Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, entidad peruana que establece la metodología de clasificación de la peligrosidad por inundación.
DEM	Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevación), representación raster de la superficie topográfica que constituye el insumo base para la delimitación de la cuenca y el análisis morfométrico.
Froude	Número adimensional ($Fr = v/\sqrt{gd}$) que relaciona las fuerzas de inercia con las gravitacionales y clasifica el régimen del flujo en subcrítico ($Fr < 1$), crítico ($Fr = 1$) o supercrítico ($Fr > 1$).
HEC-HMS	Hydrologic Modeling System del USACE, modelo de transformación lluvia-escorrentía empleado para la obtención de los caudales de diseño por periodo de retorno.
Log-Pearson III	Distribución de probabilidad aplicada a los logaritmos de los caudales máximos anuales, empleada en el análisis de frecuencia para estimar los caudales de diseño.
Malla no estructurada	Discretización del dominio de cálculo mediante elementos triangulares de geometría variable, que se adaptan a los contornos irregulares del cauce y permiten el refinamiento local.
Manning	Coeficiente de rugosidad (n) que cuantifica la resistencia al flujo ejercida por el fondo y las paredes del cauce, parámetro central en la calibración del modelo hidráulico.
MEF	Método de Elementos Finitos, técnica de discretización que divide el dominio en elementos interconectados por nodos, empleada por TELEMAC-2D para resolver las ecuaciones de aguas someras.
Morfometría	Medición y análisis cuantitativo de las formas del relieve y de la red de drenaje de una cuenca, orientado a inferir su comportamiento hidrológico.
NAME	Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias, cota que alcanza la superficie libre del agua durante la avenida de diseño, referencia para el dimensionamiento de obras ribereñas.
Periodo de retorno	Intervalo promedio de tiempo, expresado en años, en el que un evento de determinada magnitud es igualado o superado, base para la selección del caudal de diseño.
Peligrosidad	Grado de amenaza del flujo sobre las personas y estructuras, determinado por la combinación del tirante y la velocidad del agua según los criterios del CENEPRED.
Saint-Venant	Sistema de ecuaciones de aguas someras que gobierna el flujo bidimensional en lámina libre, compuesto por una ecuación de continuidad y dos de cantidad de movimiento.
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, entidad que administra las estaciones meteorológicas cuyos registros alimentan el análisis hidrológico.
TELEMAC-2D	Modelo hidrodinámico bidimensional de elementos finitos desarrollado por Électricité de France, empleado para la simulación del comportamiento hidráulico del río Pongora.
Tirante	Profundidad del flujo medida verticalmente desde el fondo del cauce hasta la superficie libre del agua, indicador directo de la severidad de la inundación.

ACRÓNIMOS

ALOS	Advanced Land Observing Satellite, satélite japonés cuyo sensor PALSAR provee el modelo digital de elevación de 12.5 m empleado en la malla del tramo modelado.
ANA	Autoridad Nacional del Agua, ente rector del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos del Perú.
CENEPRED	Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, entidad que norma la clasificación de la peligrosidad por inundación.
CN	Curve Number (Número de Curva), parámetro del método del SCS que estima la escorrentía directa según el suelo y la cobertura vegetal.
DEM	Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevación), representación raster de la superficie topográfica usada en la delimitación de la cuenca.
DRTCA	Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones de Ayacucho, entidad que elaboró el estudio hidrológico de referencia del río Pongora.
EPSG	European Petroleum Survey Group, código que identifica el sistema de coordenadas de referencia; en esta investigación EPSG:32718 (UTM 18S).
IDF	Intensidad-Duración-Frecuencia, curvas que relacionan la intensidad de la precipitación con su duración y periodo de retorno.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, panel que evalúa la información científica sobre el cambio climático y sus impactos.
HEC-HMS	Hydrologic Modeling System, modelo del USACE para la simulación del proceso lluvia-escorrentía.
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System, modelo hidráulico del USACE de referencia basado en volúmenes finitos.
MEF	Método de Elementos Finitos, técnica numérica de discretización empleada por TELEMAC-2D para resolver las ecuaciones de aguas someras.
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, entidad que aprueba el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje.
MVF	Método de Volúmenes Finitos, técnica numérica empleada por HEC-RAS e Iber, alternativa al método de elementos finitos.
NAME	Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias, cota de la superficie libre del agua durante la avenida de diseño.
RMSE	Root Mean Squared Error (Raíz del Error Cuadrático Medio), métrica que cuantifica la magnitud del error entre valores simulados y observados.
SCS	Soil Conservation Service, servicio que desarrolló el método del Número de Curva para el cálculo de la escorrentía.
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, entidad que administra las estaciones meteorológicas del área de estudio.
SIG	Sistema de Información Geográfica, entorno informático para el análisis, gestión y representación de información espacial.
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission, misión que provee el modelo digital de elevación de 30 m usado en la delimitación de la cuenca completa.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de la cuenca hidrográfica, en km². Parámetro morfométrico fundamental del que dependen la mayoría de los índices de forma.
D_d	Densidad de drenaje, cociente entre la longitud total de cauces y el área de la cuenca, en km/km².
Fr	Número de Froude, parámetro adimensional que clasifica el régimen del flujo: $Fr = v/\sqrt{g\,d}$.
g	Aceleración de la gravedad, igual a 9.81 m/s², empleada en el cálculo del número de Froude y en las ecuaciones de aguas someras.
h	Tirante o profundidad del flujo, medido verticalmente desde el fondo del cauce hasta la superficie libre, en metros.
H	Indicador de peligrosidad por inundación, definido como el producto del tirante por la velocidad ($H = h \cdot v$), en m²/s.
K_c	Coeficiente de compacidad de Gravelius, relación entre el perímetro de la cuenca y el de un círculo de igual área. $K_c \geq 1$.
L	Longitud del cauce principal, en km, empleada en el cálculo del tiempo de concentración y del factor de forma.
n	Coeficiente de rugosidad de Manning, que cuantifica la resistencia al flujo del cauce y las márgenes. Adimensional.
P	Perímetro de la cuenca hidrográfica, en km, empleado en el cálculo del coeficiente de compacidad.
Q	Caudal, volumen de agua que atraviesa una sección por unidad de tiempo, en m³/s. Condición de contorno de entrada del modelo.
R	Radio hidráulico, cociente entre el área mojada y el perímetro mojado de la sección, en metros.
R_b	Relación de bifurcación, cociente entre el número de cauces de un orden y el del orden inmediatamente superior.
R_e	Relación de elongación, parámetro morfométrico de forma que compara el diámetro de un círculo de igual área con la longitud de la cuenca.
S	Pendiente del cauce o de la línea de energía, adimensional (m/m), empleada en la ecuación de Manning.
S_0	Pendiente del fondo del canal, adimensional, empleada en la ecuación del flujo gradualmente variado.
S_f	Pendiente de la línea de fricción, adimensional, componente de la ecuación del flujo gradualmente variado.
T_c	Tiempo de concentración, intervalo que tarda el agua en desplazarse desde el punto más alejado de la cuenca hasta la salida, en horas.
Tr	Periodo de retorno, intervalo promedio en años en que un evento es igualado o superado. Valores empleados: 25, 50, 100, 140, 200 y 500 años.
u, v	Componentes de la velocidad promediada en profundidad en las direcciones x e y, en m/s, de las ecuaciones de aguas someras.
v	Velocidad media del flujo, en m/s, parámetro del comportamiento hidráulico y de la ecuación de Manning.
y	Tirante del flujo en la ecuación del flujo gradualmente variado, en metros.

TESIS

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1. A nivel mundial

Las inundaciones fluviales figuran entre los desastres naturales de mayor impacto económico y humano en el mundo. Entre los años 2000 y 2019 se registraron 7 348 desastres a escala global, que ocasionaron 1,23 millones de muertes y pérdidas económicas por 2,97 billones de dólares (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2020). La exposición de la población a este peligro es masiva. El Banco Mundial determinó que 1 470 millones de personas, equivalentes al 19 % de la población mundial, están directamente expuestas a riesgos sustanciales durante eventos de inundación con periodo de retorno de cien años, y que el 77 % de los 5,3 billones de dólares de actividad económica situada en zonas inundables se concentra en países de ingreso medio y alto (Rentschler & Salhab, 2020).

La proyección futura agrava el panorama. Willner et al. (2018) estimaron que las pérdidas económicas totales por inundaciones fluviales aumentarán un 17 % a escala global en las próximas dos décadas, con un incremento del 82 % en el país más afectado. El cambio climático es el principal motor de esta tendencia. El Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático advirtió que los daños directos por inundación serían entre 1,4 y 2 veces mayores con un calentamiento de 2 °C, y entre 2,5 y 3,9 veces mayores con 3 °C, en comparación con un escenario de 1,5 °C sin adaptación (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022).

El comportamiento hidráulico de un río durante una crecida se representa mediante las ecuaciones de Saint-Venant, que pueden resolverse por el método de elementos finitos sobre mallas no estructuradas. Este enfoque fue formalizado desde los trabajos fundacionales de Scarlatos (1982), quien desarrolló un esquema de Galerkin implícito e incondicionalmente estable para dichas ecuaciones. En la actualidad, el modelo de elementos finitos TELEMAC-2D resuelve estas ecuaciones sobre malla triangular con ley de fricción de Manning-Strickler (Godara et al., 2024b), y su capacidad para representar geometrías fluviales complejas lo convierte en una herramienta idónea para la modelación de ríos de montaña.

1.1.2. A nivel de Latinoamérica

En Latinoamérica, las inundaciones concentran la mayor parte de los daños económicos por desastres. Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, las inundaciones por fenómenos meteorológicos representaron el 53 % de los daños en la región entre 1970 y 2022, con un costo económico acumulado de 174 301 millones de dólares (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2023). Solo en el año 2022, los daños y pérdidas económicas por desastres en la región ascendieron a 1 789 millones de dólares (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2023).

Las cuencas andinas presentan condiciones que intensifican el peligro: Pendientes pronunciadas, lluvias intensas de corta duración y una urbanización que ocupa progresivamente las márgenes de los ríos. Pinos y Timbe (2019b) evaluaron el desempeño de modelos hidráulicos bidimensionales en un tramo del río Santa Bárbara, ubicado en los Andes ecuatorianos a 2 330 metros sobre el nivel del mar, y demostraron que la modelación numérica reproduce adecuadamente el nivel del agua y la extensión de la inundación, con un índice de ajuste promedio del 82 % para un periodo de retorno de cincuenta años. En un trabajo posterior, Pinos et al. (2020) señalaron que la investigación regional sobre inundaciones en ríos de montaña se apoya de forma predominante en programas de dominio público, como HEC-RAS e Iber, lo que evidencia una concentración metodológica hacia el método de volúmenes finitos.

La caracterización morfométrica de las cuencas altoandinas ha demostrado su valor para inferir la respuesta hidrológica. Del Águila Ríos y Mejía Marcacuzco (2021) analizaron dos cuencas altoandinas del Perú mediante sistemas de información geográfica y modelos digitales de elevación ALOS PALSAR, y establecieron que la forma alargada y la baja densidad de drenaje de estas cuencas condicionan su vulnerabilidad ante crecidas súbitas. Este enfoque confirma la pertinencia del análisis morfométrico como paso previo a la modelación hidráulica.

1.1.3. A nivel nacional

En el Perú, la frecuencia y severidad de los desastres por inundación mantiene una tendencia creciente. Las emergencias por inundaciones y movimientos en masa pasaron de 4 658 en el año 2022 a 8 406 en 2023, y el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres estima que más de 13,5 millones de personas son vulnerables a inundaciones (Sociedad de Comercio Exterior del Perú, 2024). El impacto de eventos recientes ilustra la magnitud del problema: Durante la temporada de lluvias 2024–2025 se registraron 168 428 afectados y 89 fallecidos a nivel nacional (Sociedad de Comercio Exterior del Perú, 2024). El Centro Nacional de Planeamiento Estratégico ha documentado, de forma consistente, el incremento sostenido de los eventos climáticos extremos en el territorio nacional (Centro Nacional de Planeamiento Estratégico, 2024).

La gestión de los recursos hídricos en el país se rige por la Ley de Recursos Hídricos, que en su artículo 119 fomenta los programas integrales de control de avenidas y prevención de daños por inundación (Congreso de la República del Perú, 2009). El cálculo de los caudales de diseño y la selección de los periodos de retorno se sustentan en el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, que establece las distribuciones estadísticas de Log-Pearson III y Gumbel, y recomienda un periodo de retorno de quinientos años para el cálculo de la socavación en puentes y defensas ribereñas (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011).

A pesar de este marco normativo, la práctica de la modelación hidráulica bidimensional en el Perú se apoya casi exclusivamente en programas basados en el método de volúmenes finitos. Los estudios nacionales recurren de forma predominante a HEC-RAS e Iber para

la generación de mapas de inundación en ríos peruanos (Quispe Huamán, 2019). Esta preferencia metodológica deja sin explorar el método de elementos finitos, que ofrece ventajas para la representación de geometrías fluviales complejas mediante mallas no estructuradas.

1.1.4. A nivel regional

La región Ayacucho se ubica entre las más afectadas por los desastres hidrometeorológicos del país. Durante la temporada de lluvias 2024–2025 figuró entre las regiones más golpeadas a nivel nacional, con 335 emergencias registradas (Sociedad de Comercio Exterior del Perú, 2024). En este contexto, la Autoridad Nacional del Agua identificó al río Pongora (Ocopa) entre los puntos críticos con peligro de inundación de la región, dentro de un conjunto de 40 puntos críticos que comprometen a 19 869 habitantes y 3 803 viviendas en el departamento (Autoridad Nacional del Agua, 2025). Esta identificación oficial confirma la condición de amenaza del río Pongora para las poblaciones y los terrenos agrícolas ribereños, ya documentada por estudios hidráulicos previos.

Castillo Cruz (2017a) desarrolló un modelamiento hidráulico unidimensional y bidimensional acoplado con transporte de sedimentos para el dimensionamiento de una defensa ribereña en el sector de Pacaycasa, y documentó que el río Pongora inunda de forma recurrente los terrenos agrícolas de ambas márgenes. Posteriormente, Felix Pahuara (2023b) evaluó el riesgo por inundación fluvial en la comunidad de Pongora mediante la metodología del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, y determinó que el 6 % de las viviendas se encuentra en riesgo muy alto y el 7 % en riesgo alto, con 5,3 hectáreas de cultivo afectadas. Ambos antecedentes, desarrollados en la misma casa de estudios, abordaron el problema con enfoques unidimensionales, bidimensionales de volúmenes finitos o de evaluación de riesgo, pero ninguno empleó el método de elementos finitos.

1.1.5. Brecha de conocimiento

La revisión del estado del arte revela un vacío metodológico preciso. A nivel internacional, la serie de trabajos demuestra la idoneidad del modelo de elementos finitos TELEMAC-2D para la simulación de crecidas en cuencas pequeñas y empinadas, mediante la técnica de lluvia sobre malla, y documenta el flujo de trabajo que integra el preprocesamiento de la malla, la simulación y el postprocesamiento de resultados. Sin embargo, en el Perú las aplicaciones documentadas de TELEMAC-2D se han limitado al diseño de estructuras hidráulicas puntuales, como bocatomas y desarenadores, y no a la modelación de la inundación fluvial de un río a lo largo de un tramo extenso.

Tras la revisión de los repositorios nacionales, no se localizó ninguna aplicación publicada del método de elementos finitos, mediante TELEMAC-2D, para el mapeo de inundación fluvial en ríos peruanos ni en cuencas andinas del país. Este vacío define el problema que la presente investigación aborda. La ausencia de una evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora que integre el análisis morfométrico de su cuenca con la

modelación numérica por elementos finitos impide contar con mapas de inundación precisos que sustenten la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial en la zona. La tesis se propone llenar este vacío al aplicar, por primera vez de forma documentada en una cuenca altoandina de Ayacucho, la modelación con elementos finitos acoplada al análisis morfométrico.

1.2. Delimitación del problema

1.2.1. Delimitación espacial

La investigación se circunscribe espacialmente a la cuenca del río Pongora, ubicada en la región Ayacucho, provincia de Huamanga. La cuenca tiene una extensión aproximada de 1 127.68 km^2 y una longitud de cauce principal de 68.69 km, según el estudio hidrológico oficial de la DRTCA (2022). El análisis morfométrico abarca la totalidad de la cuenca, delimitada a partir del modelo digital de elevación.

La modelación hidráulica bidimensional, en cambio, se concentró en un tramo representativo del río de aproximadamente 10 km, comprendido dentro del dominio de 10×10 km que cubre el modelo digital de elevación ALOS PALSAR de 12.5 m empleado para la malla de elementos finitos, en torno al punto de aforo oficial del puente proyectado (583 827 m E; 8 553 291 m N, en el sistema UTM WGS84 zona 18 L). Este tramo concentra las zonas de mayor interés para la evaluación del peligro por inundación.

1.2.2. Delimitación temporal

El año 2025 consignado en el título corresponde al periodo de referencia establecido en el proyecto de investigación aprobado institucionalmente por la Facultad. La ejecución, el procesamiento de información, la modelación y la verificación de campo se desarrollaron durante el año 2026, conforme a la ampliación de plazo autorizada. El proyecto de tesis que comprendió la recopilación y el procesamiento de la información, el análisis morfométrico, la modelación hidrológica e hidráulica, la verificación de campo y la redacción del informe se extendió a lo largo de aproximadamente un año, concentrándose en el periodo 2026.

Cabe precisar que, si bien la ejecución de la investigación corresponde al año 2026, los datos de entrada empleados son de carácter histórico: Las series de precipitación máxima en 24 horas de las estaciones del SENAMHI abarcan entre 15 y 33 años de registro, y el estudio hidrológico de la DRTCA data de 2022. Esta condición es coherente con el diseño transversal y retrospectivo de la investigación, en el que la información preexistente se analiza en un único momento para caracterizar y modelar el comportamiento hidráulico del río.

1.2.3. Temática y unidad de análisis

- **Temática:** La temática de esta investigación se circunscribe al campo de la ingeniería hidrológica e hidráulica, con el apoyo de la modelación numérica mediante el método de los elementos finitos. El estudio se centra en la evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir de dos componentes articulados: El análisis morfométrico de la cuenca, que describe la respuesta hidrológica del sistema, y

la simulación bidimensional del flujo con el modelo TELEMAC-2D, que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant sobre una malla de elementos finitos. La investigación integra conocimientos de hidrología estadística, transformación lluvia-escorrentía, hidráulica de canales naturales y modelación numérica, orientados a caracterizar el comportamiento del cauce ante distintos periodos de retorno y a sustentar la gestión del riesgo por inundación.

- **Unidad de análisis:** La unidad de análisis principal de esta investigación es el **tramo del río Pongora y su área de influencia hidráulica**, sometido a los escenarios de caudal de diseño asociados a los distintos periodos de retorno, dado que es sobre este tramo donde se evalúa la variable dependiente —el comportamiento hidráulico—. Los registros pluviométricos de las estaciones del SENAMHI no constituyen la unidad de análisis; son **unidades de observación** que aportan los datos de entrada, junto con los nodos de la malla de elementos finitos, los puntos de control y de verificación de campo, y los seis escenarios de periodo de retorno. Cada observación de precipitación corresponde a la serie histórica de precipitación máxima en 24 horas de una estación. El conjunto de unidades de observación comprende seis estaciones pluviométricas Quinua, Tambillo, Cuchoquesera, Pucaloma, Chontaca y Chiara, organizadas en las siguientes categorías de variables:

  I) **Variables pluviométricas de base:** Precipitación máxima en 24 horas de las seis estaciones del SENAMHI, sometidas previamente a las pruebas de consistencia y de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov.

  II) **Variables hidrológicas derivadas:** Precipitaciones de diseño para los periodos de retorno de 25, 50, 100, 140, 200 y 500 años, ajustadas con la distribución Log-Pearson tipo III y el factor de corrección de la OMM (1.13); curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) obtenidas por el método de Dick y Peschke; y caudales máximos de diseño calculados mediante la transformación lluvia-escorrentía con HEC-HMS.

  III) **Variables morfométricas de la cuenca:** Área ($\approx$1 127.68 km^2), perímetro, longitud y pendiente del cauce principal ($\approx$68.69 km), densidad de drenaje y orden de la red según Strahler, derivadas del modelo digital de elevación (SRTM 30 m para la cuenca y ALOS PALSAR 12.5 m para el tramo modelado).

  IV) **Variables hidráulicas del modelo por elementos finitos:** Como datos de entrada, el coeficiente de rugosidad de Manning (n = 0.040 en el cauce principal) y la geometría de la malla de elementos finitos; como variables de salida de TELEMAC-2D, los tirantes, las velocidades de flujo y la extensión de las áreas de inundación para cada periodo de retorno.

  Cada registro pluviométrico fue verificado contra la información oficial del SENAMHI, y los parámetros hidrológicos e hidráulicos se contrastaron con el estudio hidrológico de la DRTCA (2022), garantizando la trazabilidad documental de los valores numéricos empleados en el análisis y en la modelación. De este modo, las unidades de

observación convergen en la unidad de análisis principal: Cada estación aporta la precipitación que, a través de la transformación lluvia-escorrentía, se traduce en un caudal de diseño, y cada caudal de diseño se impone como condición de frontera sobre el tramo del río Pongora, que es donde finalmente se observa, nodo por nodo, el comportamiento hidráulico evaluado.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cuál es el comportamiento hidráulico del río Pongora y cómo puede evaluarse a partir del análisis morfométrico y la modelación numérica con elementos finitos en Ayacucho – 2025?

1.3.2. Problemas específicos

1. ¿Cuáles son las principales características morfométricas de la cuenca del río Pongora y qué relación guardan con su dinámica hidrológica?
2. ¿Qué condiciones hidráulicas presenta el río Pongora bajo diferentes escenarios de caudal?
3. ¿Cómo puede implementarse un modelo numérico con elementos finitos que simule de manera adecuada el flujo en el río Pongora?
4. ¿Qué grado de correspondencia existe entre las características morfométricas de la cuenca y los resultados de la modelación numérica del comportamiento hidráulico del río Pongora?
5. ¿Qué implicancias tienen los resultados obtenidos para la gestión del recurso hídrico y la prevención de riesgos en la cuenca del río Pongora?

1.4. Justificación e importancia

- **Conveniencia:** La presente investigación responde a una necesidad concreta de la gestión del riesgo hídrico en la región Ayacucho. El río Pongora desborda de manera recurrente e inunda cada año los terrenos agrícolas asentados en ambas márgenes de su cauce (Castillo Cruz, 2017b), y compromete la infraestructura vial proyectada sobre él, para la cual el estudio hidrológico de la DRTCA (2022) estableció caudales de diseño de 444.10 m^3/s (Tr = 140 años) y 753.40 m^3/s (Tr = 500 años). De hecho, la Autoridad Nacional del Agua identificó al río Pongora (Ocopa) entre los puntos críticos con peligro de inundación de la región Ayacucho (Autoridad Nacional del Agua, 2025). Pese a esta problemática, el río no cuenta con una caracterización de su comportamiento hidráulico sustentada en modelación numérica bidimensional.
- **Relevancia social:** El estudio confronta una problemática de elevado impacto socioeconómico para la comunidad de Pongora, cuya población depende de la agricultura desarrollada en las márgenes del río. La evaluación de riesgo más reciente reportó 5.3 hectáreas de cultivo afectadas y un 13 % de las viviendas en nivel de riesgo alto o muy alto (Felix Pahuara, 2023a). Esta situación no es aislada: En marzo de 2019 el desborde del río Seco Totorita sepultó con lodo y piedras los

campos de cultivo de la comunidad de Pongora y dejó intransitables las vías del valle, afectando a productores cuya economía depende de la venta de hortalizas (El Comercio, 2019); y de manera más reciente se reportó nuevamente el desborde del río Pongora inundando campos de cultivo en la comunidad de San José de Viñaca (Plural Noticias, 2024). La delimitación precisa de las zonas inundables para distintos periodos de retorno permitirá reducir las pérdidas económicas, proteger la seguridad alimentaria de las familias ribereñas y fortalecer la resiliencia de la comunidad frente a eventos hidrometeorológicos extremos. Los beneficiarios directos son los agricultores y pobladores asentados en las márgenes del río Pongora; los beneficiarios indirectos son las autoridades locales responsables de la prevención del riesgo de desastres en el ámbito de la cuenca.

- **Aplicaciones prácticas:** Los mapas de inundación por periodos de retorno (Tr = 25, 50, 100, 140, 200 y 500 años) que genera esta investigación tienen aplicación directa en el dimensionamiento de defensas ribereñas, en el ordenamiento territorial de las áreas próximas al cauce, en la protección de la infraestructura vial proyectada sobre el Pongora y en la formulación de medidas estructurales y no estructurales de prevención en el marco del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD). Los organismos como la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones de Ayacucho (DRTCA), la municipalidad distrital y la Autoridad Nacional del Agua (ANA) podrán emplear los resultados para orientar la inversión en obras de protección y para sustentar técnicamente los planes de gestión del riesgo, en concordancia con el objetivo específico 5 de proponer lineamientos técnicos para la gestión del recurso hídrico.
- **Utilidad metodológica:** La investigación articula una cadena metodológica completa y reproducible que integra la caracterización morfométrica de la cuenca en un entorno SIG (ArcGIS Pro), la modelación hidrológica lluvia-escorrentía con HEC-HMS a partir de las precipitaciones de diseño ajustadas con la distribución Log-Pearson tipo III , el factor de corrección y la modelación hidráulica por elementos finitos con TELEMAC-2D sobre una malla generada en Blue Kenue. Constituye, según la revisión de antecedentes, la primera aplicación documentada del modelo TELEMAC-2D (método de elementos finitos) a un río de la sierra peruana, frente al predominio de HEC-RAS e Iber en la literatura nacional. El protocolo desarrollado y en particular la contrastación entre los resultados del análisis morfométrico y los de la modelación numérica es replicable y adaptable a otras cuencas andinas de características similares, aportando un procedimiento estandarizado para la evaluación hidráulica de ríos de montaña.
- **Valor teórico:** Desde el plano teórico, la investigación amplía el conocimiento sobre la dinámica hidráulica de los ríos andinos mediante la aplicación conjunta del análisis morfométrico y la modelación numérica con elementos finitos. Aporta evidencia original sobre la correspondencia entre los parámetros morfométricos de la cuenca del Pongora y su comportamiento hidráulico simulado y llena el vacío de conocimiento derivado de que la resolución de las ecuaciones bidimensionales

de Saint-Venant mediante mallas no estructuradas de elementos finitos no había sido aplicada a ríos de la sierra peruana. El marco de referencia resultante es extrapolable a cuencas andinas de morfología comparable y sienta una base para futuras investigaciones sobre modelación hidráulica en la región.

1.5. Limitaciones de la investigación

Si bien la presente investigación evalúa el comportamiento hidráulico del río Pongora mediante el análisis morfométrico y la modelación numérica con elementos finitos, es pertinente reconocer las siguientes limitaciones inherentes al desarrollo del estudio:

- **Limitaciones en la resolución topográfica y batimétrica:** La malla de elementos finitos se construyó a partir del modelo digital de elevación ALOS PALSAR de 12.5 m de resolución. No se dispuso de un levantamiento topográfico de detalle (estación total, dron o LiDAR) ni de batimetría del cauce, por lo que la geometría fina del lecho y de las estructuras próximas en particular el puente proyectado no se representa con precisión centimétrica. Dado que la malla hereda la resolución del DEM, esta limitación introduce incertidumbre en los tirantes calculados y en la delimitación fina de la mancha de inundación.
- **Limitaciones en la calibración y validación hidrométrica:** El río Pongora no cuenta con una estación hidrométrica que registre caudales aforados. Por ello, los caudales de diseño se obtuvieron por transformación lluvia-escorrentía con HEC-HMS y se contrastaron con los valores oficiales del estudio de la DRTCA (2022), y no con mediciones directas.
- **Limitaciones en el coeficiente de rugosidad de Manning:** Los valores del coeficiente n (0.040 en el cauce principal, 0.045 en cultivo, 0.065 en ribera con vegetación, entre otros) se adoptaron de tablas de referencia y del estudio previo de la zona, sin determinarse mediante calibración in situ ni ensayos granulométricos del lecho. La rugosidad es uno de los parámetros de mayor sensibilidad en la modelación hidráulica y una de las principales fuentes de incertidumbre en las predicciones (Abouelsaad et al., 2024; Pinos & Timbe, 2019a), por lo que su adopción referencial repercute directamente en las velocidades y los niveles de agua simulados.
- **Limitaciones en la extensión del dominio modelado:** La escena ALOS de 12.5 m cubre un área aproximada de 10×10 km, de modo que la modelación hidráulica se concentró en un tramo representativo en torno al punto de aforo y al puente proyectado, y no en la totalidad del cauce (aproximadamente 68.69 km). Además, la condición de contorno de nivel aguas abajo se estimó mediante flujo normal (pendiente-Manning), y no a partir de una curva de gasto medida, lo que puede afectar los resultados en la sección de salida del dominio.
- **Limitaciones en los datos hidrológicos:** El análisis de frecuencia de las precipitaciones máximas se basó en seis estaciones del SENAMHI, algunas con series relativamente cortas (22 y 26 años en Pucaloma y Chiara, respectivamente, las más breves de las seis). La extrapolación hasta Tr = 500 años a partir de series de esta

longitud es estadísticamente exigente: No se calcularon intervalos de confianza para los cuantiles estimados ni se contrastó la distribución Log-Pearson tipo III frente a distribuciones alternativas (Gumbel, Log-Normal, GEV) mediante pruebas complementarias a Kolmogorov-Smirnov (Anderson-Darling, criterios de información AIC/BIC); la selección de Log-Pearson tipo III se sustenta en su adopción normativa por el Manual de Hidrología del MTC para este tipo de análisis, no en una comparación estadística entre distribuciones. Esta incertidumbre de extrapolación incrementa a los periodos de retorno más altos (200 y 500 años), pese a la aplicación del factor de corrección de la OMM. Asimismo, la distribución espacial de la lluvia en la cuenca se aproximó mediante polígonos de Thiessen, que asignan pesos por proximidad y no capturan los gradientes orográficos de la precipitación andina.

- **Limitaciones del enfoque hidrodinámico de lecho fijo:** La modelación se realizó con lecho fijo, resolviendo únicamente la hidrodinámica bidimensional mediante las ecuaciones de Saint-Venant, sin acoplar un módulo morfodinámico de transporte de sedimentos. Por consiguiente, el estudio no simula los procesos de erosión, sedimentación ni socavación que, en un río como el Pongora, pueden modificar la geometría del cauce durante una crecida. La incorporación de la morfodinámica queda planteada como un trabajo futuro.
- **Cadena acumulada de incertidumbre:** Los resultados hidráulicos finales no dependen de un único parámetro, sino de una cadena de insumos y decisiones metodológicas que se propagan de manera acumulada: La precipitación máxima corregida con el factor de la OMM (1.13), la distribución Log-Pearson tipo III seleccionada sin comparación estadística formal con alternativas, la ponderación espacial por Thiessen, las curvas IDF de Dick y Peschke, el número de curva (CN) del método SCS, el parámetro de tránsito Muskingum ($K = 0{,}5\,T_c$, calibrado contra solo dos puntos de referencia oficiales), el coeficiente de rugosidad de Manning adoptado de tablas, la resolución del DEM (12.5 m) y la condición de frontera de salida por tirante normal. Cada eslabón introduce una incertidumbre propia que no fue propagada cuantitativamente de forma conjunta (por ejemplo, mediante un análisis de Monte Carlo o de primer orden) hasta el resultado final de tirante y velocidad; los valores reportados en esta investigación deben leerse, por tanto, como estimaciones puntuales sujetas a esta cadena de supuestos, y no como magnitudes exentas de error. Se recomienda, para trabajos posteriores, un análisis de incertidumbre integrado que cuantifique la contribución relativa de cada eslabón.
- **Ausencia de análisis de sensibilidad de la condición de frontera de salida:** La cota de salida se estimó mediante tirante normal (Manning), sin contrastarla con una curva de gasto medida. No se evaluó cuánto cambian los resultados aguas arriba si esa condición se modifica en $\pm 10\,\%$ o $\pm 20\,\%$, prueba que permitiría establecer qué tan sensible es el tramo modelado a la condición impuesta en la frontera de salida. Esta evaluación queda planteada como trabajo futuro.
- **Ausencia de análisis de independencia de malla:** La malla de elementos finitos

empleada (30 348 nodos, 60 265 elementos) no fue contrastada contra mallas de distinta densidad (más gruesa y más fina) para verificar que el tirante y el área inundada no varíen de forma significativa entre refinamientos consecutivos. Esta verificación requiere generar nuevas mallas en BlueKenue, software que no se encontraba instalado al cierre de esta investigación, por lo que también queda planteada como trabajo futuro; en su ausencia, la resolución adoptada se sustenta en el buen indicador de calidad geométrica de la malla (ángulo mínimo medio de 45°, relación de aspecto cercana a la unidad) y en el balance de masa cercano a la precisión de máquina, pero no en una prueba formal de convergencia numérica.

1.6. Objetivos de la investigación

1.6.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico de su cuenca y la modelación numérica con elementos finitos, en la región Ayacucho – 2025.

1.6.2. Objetivos específicos

1. Determinar las principales características morfométricas de la cuenca del río Pongora y su influencia en la dinámica hidrológica.
2. Analizar el comportamiento hidráulico del río Pongora bajo diferentes condiciones de caudal representativas.
3. Implementar un modelo numérico con elementos finitos que simule de manera adecuada el flujo del río Pongora.
4. Contrastar las características morfométricas de la cuenca con los resultados de la modelación numérica para verificar su consistencia respecto al comportamiento hidráulico del río Pongora.
5. Proponer lineamientos técnicos que contribuyan a la gestión del recurso hídrico y a la reducción de riesgos asociados al río Pongora.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Investigaciones internacionales:Artículos científicos

A continuación, se exponen las investigaciones internacionales que han abordado la modelación de inundaciones fluviales desde distintos enfoques metodológicos: La simulación hidrodinámica (TELEMAC-2D, HEC-RAS 2D, Iber 2D, MIKE 21), la modelación hidrológica de tipo lluvia-escorrentía (HEC-HMS, método SCS-CN), el análisis morfométrico de cuencas mediante sistemas de información geográfica (SIG) y, de manera más reciente, la aplicación de técnicas de aprendizaje automático (redes LSTM, redes neuronales líquidas y esquemas guiados por física) orientadas a acelerar la predicción de crecidas. El Cuadro 1 sintetiza los hallazgos más representativos de esta selección, ordenados de la publicación más reciente a la más antigua, con énfasis en el aporte principal de cada estudio y en la brecha o limitación identificada respecto a la modelación hidráulica de inundaciones en ríos andinos peruanos.

Liu, Zheng et al. (2026) desarrollaron un marco detallado con restricciones físicas para la simulación de inundaciones urbanas. Incorporaron un mecanismo de compuerta orientado a procesos dentro de una arquitectura de aprendizaje profundo que reemplazó parcialmente al modelo hidrodinámico completo. El esquema reprodujo los campos de profundidad y velocidad con errores inferiores al 5 % respecto al modelo de referencia. La velocidad de cálculo se incrementó en más de dos órdenes de magnitud frente a la simulación hidrodinámica convencional. Concluyeron que la imposición de restricciones físicas en la red neuronal garantiza coherencia con las ecuaciones de Saint-Venant sin sacrificar eficiencia computacional.

Liu, Zheng et al. (2026) propusieron una red neuronal líquida guiada por principios físicos (Physics-Guided Liquid Neural Network) para la predicción rápida de inundaciones urbanas. Entrenaron el modelo con simulaciones del software SWMM acoplado a un módulo hidrodinámico bidimensional. Los coeficientes de determinación (R^2) superaron 0.95 en la predicción de profundidades máximas de agua. El tiempo de inferencia se redujo de horas a segundos respecto al modelo numérico completo. Determinaron que la arquitectura líquida captura mejor la dinámica temporal del escurrimiento que las redes LSTM convencionales.

Soto-Escobar et al. (2026) elaboraron curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) para Chile continental a partir de cinco productos de precipitación grillada subdiaria (IMERGv06B, IMERGv07B, ERA5, ERA5-Land y CMORPH-CDR) y 161 pluviómetros con control de calidad. Ajustaron distribuciones de Gumbel estacionarias y no estacionarias para seis períodos de retorno (2 a 100 años) y once duraciones (1 a 72 h). Identificaron tendencias decrecientes significativas en las intensidades de precipitación en gran parte del territorio. Las mayores intensidades para duraciones superiores a 24 h se concentraron en la zona andina entre las regiones del Maule y la Araucanía (35–40°S). Publicaron los resultados en la plataforma de acceso libre curvasIDF.cl.

Coppo Frías et al. (2025) integraron datos altimétricos del satélite ICESat-2 (producto ATL03) y bandas espectrales de Sentinel-2 en un modelo hidráulico bidimensional MIKE 21. Corrigieron el modelo digital de elevación FabDEM mediante una red neuronal artificial entrenada con las elevaciones satelitales, logrando una resolución refinada de 10 m. El error cuadrático medio se redujo en promedio 7 cm y hasta 38 cm en las cercanías de los cauces. El índice de éxito crítico (CSI) mejoró hasta un 19 % y la tasa de sesgo disminuyó hasta un 25 %. Aplicaron la metodología en las planicies de inundación del tramo alto del río Amarillo, China, y concluyeron que el enfoque es escalable a entornos con escasa instrumentación.

Cifuentes-Herrera et al. (2025) estructuraron un esquema de gestión integrada de recursos hídricos bajo el enfoque de servicios ecosistémicos en la microcuenca Chimulala, Perú (cuenca del río Jequetepeque, 5.48 km^2, 2774–3760 m s.n.m.). Recopilaron datos de 35 participantes (11 institucionales y 24 actores locales) mediante encuestas y grupos focales para valorar 15 servicios ecosistémicos identificados. Elaboraron un mapa de cobertura a escala 1:5000 con imágenes Landsat 8 y SPOT. La comunidad de Mutish reconoció 12 de los 15 servicios, mientras que Rodeopampa identificó solo 9. Concluyeron que las evaluaciones socioculturales de servicios ecosistémicos permiten articular perspectivas divergentes y fortalecer la gobernanza participativa del recurso hídrico en cuencas andinas.

Chissende et al. (2025) evaluaron la susceptibilidad a inundaciones fluviales mediante morfometría de cuencas de drenaje en el río Bahe, China. Procesaron un modelo digital de elevación con herramientas SIG y calcularon parámetros lineales, areales y de relieve para cada subcuenca. Aplicaron el proceso analítico jerárquico (AHP) para ponderar los índices morfométricos y clasificar las subcuencas en categorías de susceptibilidad. Las subcuencas con mayor densidad de drenaje, pendientes pronunciadas y formas compactas presentaron la susceptibilidad más elevada. Concluyeron que la integración de morfometría cuantitativa y AHP constituye una herramienta eficaz para la identificación de zonas con predisposición a crecidas fluviales.

Enu et al. (2025) plantearon un análisis basado en escenarios para la mitigación del riesgo de inundaciones mediante soluciones basadas en la naturaleza. Emplearon el modelo hidrodinámico TELEMAC-2D para simular múltiples escenarios de crecida con distintas configuraciones de humedales como infraestructura verde. Evaluaron la reducción porcentual del área inundada y de las profundidades máximas bajo cada escenario. Los resultados mostraron reducciones significativas en la extensión de la inundación cuando se incorporaron humedales de retención en las zonas de planicie aluvial. Determinaron que las soluciones basadas en la naturaleza representan una alternativa viable y complementaria a las obras hidráulicas convencionales para la gestión territorial del riesgo.

Arana-Ruedas et al. (2025) delimitaron zonas propensas a inundación en la cuenca del río Mantaro, Perú (34 363 km^2), mediante ArcGIS y Google Earth Engine con un DEM de 30 m de resolución. Analizaron 18 subcuencas a partir de 10 parámetros morfométricos: Relieve de cuenca, densidad de drenaje, frecuencia de cauces, relación de circularidad, pendiente media, relación de elongación, factor de forma, entre otros. Aplicaron la técnica de suma

ponderada para clasificar las subcuencas en cuatro niveles de prioridad. El 74.38 % del área total de la cuenca exhibió susceptibilidad alta a muy alta. Las subcuencas MSW_14, MSW_8 y MSW_11 requieren intervención prioritaria, con un relieve de cuenca que varió entre 482 y 5258 m.

Abouelsaad et al. (2024) calibraron automáticamente el coeficiente de rugosidad de Manning en el río Nilo, Egipto, en el tramo entre la presa de Naga Hammadi y la barrera de Asyut. Compararon los modelos HEC-RAS 1D y TELEMAC-2D, y aplicaron el método de optimización Dual-Annealing para la calibración espacialmente variable del coeficiente n. Con TELEMAC-2D obtuvieron errores promedio de 4 cm y 7 cm en los niveles de agua para dos escenarios de descarga distintos. Derivaron además una ecuación empírica para el caudal y el tiempo de residencia con un coeficiente de correlación $R = 0{,}95$. Concluyeron que la calibración automática con TELEMAC-2D supera al enfoque unidimensional convencional en la representación de la variabilidad espacial de la rugosidad.

Yan et al. (2024) formularon un enfoque integrado para la evaluación del riesgo de inundaciones urbanas mediante un modelo hidrodinámico acoplado 1D–2D y un método mejorado de proyección de búsqueda (Projection Pursuit). El componente unidimensional resolvió el flujo en la red de drenaje, mientras que el bidimensional simuló el escurrimiento superficial en calles y áreas impermeables. Integraron índices de amenaza, exposición y vulnerabilidad en un mapa de riesgo compuesto. Clasificaron las zonas urbanas en cinco niveles de riesgo y validaron los resultados con registros históricos de inundaciones. Concluyeron que el acoplamiento 1D–2D con el método de proyección mejorado proporciona mapas de riesgo más representativos que los enfoques desacoplados.

Godara et al. (2024a) contrastaron los modelos TELEMAC-2D y HEC-RAS 2D para la simulación de crecidas súbitas mediante la técnica Rain-on-Grid en la cuenca de Sleddalen, Noruega (10.5 km^2, pendiente media 0.5 m/m, elevación 77–1379 m). Emplearon el método del Número de Curva (CN) en ambas plataformas y adicionalmente el método Green-Ampt Redistribution (GAR) en HEC-RAS 2D. Para eventos de tormenta simple, ambos modelos alcanzaron valores de NSE entre 0.70 y 0.90 y R^2 entre 0.93 y 0.95. TELEMAC-2D resultó aproximadamente cinco veces más rápido que HEC-RAS 2D en tiempo de cómputo. Sin embargo, ninguno de los dos modelos reprodujo adecuadamente eventos multipico de larga duración, debido a la ausencia de algoritmos de flujo subsuperficial de retorno. Concluyeron que la técnica Rain-on-Grid es efectiva únicamente para eventos de tormenta simple con duración inferior a 10–15 h.

Torrefranca y Otadoy (2024) caracterizaron morfométricamente las cuencas hidrográficas de Bohol, Filipinas, mediante ArcGIS y un modelo digital de elevación SRTM. Calcularon parámetros de forma, relieve y red de drenaje para cada subcuenca, incluyendo densidad de drenaje, relación de bifurcación, relación de circularidad e índice hipsométrico. Determinaron que las cuencas con formas elongadas y baja densidad de drenaje presentan tiempos de concentración más prolongados. La información generada facilitó la priorización de áreas vulnerables a procesos erosivos e hidrológicos extremos en el

archipiélago central filipino.

Blöschl et al. (2024) generaron mapas de amenaza por inundación a escala nacional en Austria con resolución de 2 m, cubriendo 38 000 km de cauces y aproximadamente 21 000 cuencas no aforadas. Procesaron registros de 781 estaciones de aforo (mediana de 40 años de datos) y resolvieron las ecuaciones de aguas someras con un esquema de volúmenes finitos de segundo orden implementado en 10 GPU NVIDIA Titan RTX. Austria fue dividida en 182 dominios de simulación con aproximadamente 20 000 millones de celdas computacionales; el escenario de crecida centenaria requirió 28 días de procesamiento. Obtuvieron tasas de acierto (hit rates) entre 0.84 y 0.88 y tasas de falsa alarma decrecientes de 0.23 a 0.12 para períodos de retorno de 30 a 300 años. Emplearon un DEM lidar de 1 m de resolución como insumo topográfico base.

Vashist y Singh (2023b) simularon la inundación en la cuenca del río Krishna, India, mediante HEC-RAS 2D con modelos digitales de elevación ALOS PALSAR de 12.5 m y SRTM de 30 m de resolución. Modelaron el evento de crecida de octubre de 2009 (30 de septiembre al 5 de octubre). Con el DEM de 12.5 m, la extensión inundada alcanzó 322.49 km^2 y la velocidad máxima 2.65 m/s. Con el DEM de 30 m, la extensión se redujo a 281.03 km^2 y la velocidad máxima a 1.57 m/s. Los resultados con resolución de 12.5 m concordaron satisfactoriamente con los reportes históricos de inundación. Concluyeron que la resolución del DEM influye significativamente en la estimación de áreas inundadas y velocidades de flujo.

Sutradhar y Mondal (2023) priorizaron subcuencas del río Ajay, India oriental, a partir de parámetros morfométricos vinculados a la gestión de inundaciones. Procesaron un DEM ASTER con ArcGIS y calcularon parámetros lineales (relación de bifurcación, longitud media de cauces), areales (densidad de drenaje, frecuencia de cauces, factor de forma, relación de circularidad) y de relieve (relación de relieve, número de rugosidad). Construyeron un parámetro compuesto (C_p) para cada subcuenca y las clasificaron en categorías de prioridad alta, media y baja. Las subcuencas de mayor prioridad coincidieron con los tramos históricamente afectados por crecidas. Determinaron que las cuencas con elevada densidad de drenaje, pendiente pronunciada y formas compactas son las más susceptibles a inundaciones.

Joy et al. (2023) aplicaron SIG y teledetección en el análisis morfométrico de una cuenca en el sector suroccidental del delta del Ganges, Bangladesh. Procesaron mapas SRTM y cuantificaron 8 parámetros lineales, 6 areales, 8 de relieve y 5 de textura de drenaje para 4 ríos principales y 2 cuencas tributarias. El 82 % de los cauces correspondieron al primer orden según la clasificación de Strahler. La relación de circularidad fue 0.08, lo que indica una forma marcadamente elongada. El índice hipsométrico de 0.49 evidenció una etapa de madurez geomorfológica. Identificaron que la porción meridional de la cuenca posee mayor potencial de inundación debido a su baja pendiente y elevada densidad de drenaje.

Cardenas-Mercado et al. (2023) integraron los modelos HEC-HMS y HEC-RAS para el análisis de inundaciones urbanas en Colombia. Emplearon el método SCS-CN para la transformación lluvia-escorrentía en HEC-HMS y el coeficiente de Manning para la propagación hidráulica

en HEC-RAS. Simularon múltiples períodos de retorno y generaron hidrogramas de crecida que alimentaron el modelo hidráulico bidimensional. Los mapas de inundación resultantes delimitaron las áreas con profundidades y velocidades críticas. Incorporaron variables sociohidrológicas para complementar el análisis puramente físico. Concluyeron que la integración de ambas plataformas con información socioeconómica permite una evaluación más completa del riesgo de inundación en entornos urbanos.

Yang et al. (2023) combinaron una red neuronal LSTM con un modelo numérico acoplado (1D de red de drenaje, 2D de escurrimiento superficial y 1D de red de tuberías) para la predicción de inundaciones urbanas en Zhoukou, provincia de Henan, China (área urbana de 145.75 km^2). Generaron 832 escenarios de lluvia de 3 h de duración y 20 422 muestras de inundación en 20 puntos de monitoreo. Todos los coeficientes de determinación (R^2) del modelo LSTM superaron 0.95 para los escenarios de diseño. El error promedio del LSTM frente a los valores medidos fue de 6.34 %, comparado con 5.11 % del modelo numérico. El tiempo de cálculo se redujo de horas a segundos. Determinaron que el esquema híbrido mantiene precisión aceptable con tiempos de respuesta compatibles con la gestión de emergencias en tiempo real.

Moghim et al. (2023) examinaron el desempeño de distintos modelos de predicción de crecidas mediante una revisión comparativa de métricas de error y capacidad de ajuste. Evaluaron modelos hidrológicos (HEC-HMS, SWAT, HBV) e hidráulicos (HEC-RAS, MIKE) bajo condiciones hidrológicas variadas. Compararon los índices NSE, RMSE y R^2 reportados en la literatura para cuencas con diferentes características fisiográficas. Concluyeron que la selección del modelo más adecuado depende de la disponibilidad de datos, la escala espacial y la complejidad del régimen hidrológico de cada cuenca. Recomendaron que los estudios futuros incorporen técnicas de ensamble para mejorar la confiabilidad de las predicciones.

Godara et al. (2023) simularon crecidas súbitas en la cuenca de Sleddalen, Noruega, mediante TELEMAC-2D con la técnica Rain-on-Grid y el método del Número de Curva (SCS-CN) para la generación de escorrentía. Configuraron una malla de elementos triangulares con resolución de 100 m en las áreas de drenaje, 5 m en las proximidades del cauce y 3 m en el tramo fluvial (104 566 celdas en total). Obtuvieron valores de NSE entre 0.73 y 0.88 para los eventos de tormenta calibrados. Verificaron que el modelo reproduce satisfactoriamente los caudales pico y las extensiones de inundación para eventos de corta duración. Concluyeron que TELEMAC-2D constituye una herramienta precisa y eficiente para la simulación de crecidas repentinas en cuencas de montaña con pendientes pronunciadas.

Li et al. (2022) evaluaron el riesgo de inundación en la cuenca del río Shenzhen, China, mediante TELEMAC-2D acoplado a un análisis multiíndice con el método AHP (Analytic Hierarchy Process). Calibraron el modelo con datos de dos tormentas reales (7 de junio y 16 de septiembre de 2018), logrando una diferencia promedio de aproximadamente 2 cm entre las profundidades simuladas y las observadas en los puntos de monitoreo. Simularon 12 escenarios combinando tres períodos de retorno (20, 50 y 100 años) con cuatro coeficientes

de pico de lluvia (0.2 a 0.8). El distrito de Luohu concentró entre el 46 % y el 61 % de las zonas de máximo riesgo. Concluyeron que la integración de TELEMAC-2D con AHP proporciona mapas de riesgo aplicables a la planificación de la prevención de inundaciones en entornos urbanos costeros.

Ismail et al. (2022) realizaron un análisis morfométrico cuantitativo de cuencas hidrográficas mediante SIG y datos SRTM. Determinaron parámetros de densidad de drenaje, relación de bifurcación, relación de elongación, factor de forma y número de rugosidad para cada subcuenca. Clasificaron la respuesta hidrológica en función del parámetro compuesto resultante. Las subcuencas con relación de bifurcación elevada y alta densidad de drenaje presentaron respuestas hidrológicas rápidas y mayor susceptibilidad a crecidas. Concluyeron que el análisis morfométrico basado en SIG constituye un método accesible y replicable para la priorización de subcuencas en regiones con escasa instrumentación hidrométrica.

Broich et al. (2020) implementaron TELEMAC-2D para la simulación hidrodinámica de procesos lluvia-escorrentía mediante un modelo HDRRM (Hydrodynamic Rainfall-Runoff Model). Incorporaron el método SCS-CN para vincular la generación de escorrentía con el flujo superficial, e introdujeron modificaciones para manejar precipitación espacialmente distribuida, rugosidad dependiente del tiempo y el contorno mojado/seco. Calibraron el modelo con el evento de crecida repentina de 2016 en el distrito de Rottal-Inn, Baviera, en la estación de aforo de Simbach am Inn, y lo validaron en la cuenca adyacente de Triftern. Los resultados mostraron buena concordancia con los datos observados en ambas cuencas. Verificaron además la escalabilidad del cómputo en paralelo. Concluyeron que TELEMAC-2D con el módulo SCS-CN integrado es una herramienta precisa, eficiente y versátil para la simulación de crecidas repentinas.

Mazer et al. (2020) consolidaron un análisis hidrológico e hidráulico integrado para evaluar la amenaza por inundaciones torrenciales en Arequipa, Perú. Modelaron la respuesta de las quebradas San Lázaro, Huarangal y Venezuela con HEC-HMS para estimar los hidrogramas de crecida bajo múltiples períodos de retorno. Propagaron los caudales pico por los cauces urbanos mediante HEC-RAS para delimitar las extensiones y profundidades de inundación. Las simulaciones revelaron que los flujos torrenciales alcanzan velocidades y profundidades críticas en los tramos canalizados del casco urbano. Identificaron los sectores con mayor exposición a flujos de detritos en una ciudad andina con régimen pluvial concentrado entre diciembre y marzo.

Kaveh et al. (2019) integraron redes neuronales artificiales dentro del sistema TELEMAC-MASCARET para la modelación hidromorfodinámica. Entrenaron la red con datos generados por el módulo SED2D de transporte de sedimentos y la acoplaron al módulo hidrodinámico TELEMAC-2D. Aplicaron la metodología en un tramo del río Aist, Austria. La red neuronal reprodujo los patrones de transporte de carga de fondo con errores inferiores al 5 % respecto a la solución numérica completa. El factor de aceleración alcanzó aproximadamente 200 veces en comparación con el módulo sedimentológico original.

Concluyeron que la estrategia híbrida ANN–TELEMAC mantiene la precisión del modelo físico con tiempos de ejecución significativamente menores, lo que posibilita simulaciones a largo plazo previamente inviables.

Pinos y Timbe (2019a) evaluaron el desempeño de cuatro modelos hidráulicos bidimensionales (HEC-RAS 2D, Iber 2D, Flood Modeller 2D y PCSWMM 2D) para la generación de mapas de inundación en cuencas de montaña. Aplicaron los modelos en un tramo de 5 km del río Santa Bárbara, en Gualaceo, Andes ecuatorianos, a 2330 m s.n.m. Simularon eventos con períodos de retorno de 20 y 50 años. Iber 2D obtuvo el mejor ajuste en la estimación de niveles de agua y extensión de inundación para ambos períodos de retorno. Identificaron que la resolución de la malla, la representación de estructuras hidráulicas, el código del modelo y los valores por defecto de los parámetros constituyen las principales fuentes de incertidumbre. Concluyeron que la modelación hidráulica 2D es factible en cuencas de montaña a pesar de la complejidad topográfica, y que la selección del modelo debe considerar las características específicas del río y la disponibilidad de datos.

Cuadro 1: Comparación analítica de antecedentes internacionales sobre modelación hidrológica e hidráulica de inundaciones fluviales (2019–2026)

Autor(es)	Año	Aporte principal	Brecha/limitación identificada
Liu et al.	2026	Investigación detalla con restricciones físicas y mecanismo de compuerta orientado a procesos; error inferior al 5 % y cómputo más de 100 veces más rápido que el modelo hidrodinámico completo.	Orientado a inundación urbana con aprendizaje profundo; no valida en ríos andinos ni emplea TELEMAC-2D con caudales de diseño por periodo de retorno.
Liu et al.	2026	Red neuronal líquida guiada por principios físicos; $R^2 > 0{,}95$ en la predicción de profundidades máximas e inferencia en segundos.	Sustituye el modelo físico por inteligencia artificial; sin aplicación en cuencas de montaña ni con datos peruanos.
Soto-Escobar et al.	2026	Curvas IDF con cinco productos de precipitación grillada subdiaria y 161 pluviómetros; distribución de Gumbel estacionaria y no estacionaria (Chile).	Genera únicamente el insumo pluviométrico (IDF); no ejecuta modelación hidráulica de la inundación.
Coppo Frías et al.	2025	Integración de altimetría satelital ICESat-2 y Sentinel-2 en MIKE 21; RMSE reducido en promedio 7 cm y CSI mejorado hasta 19 % (río Amarillo, China).	Depende de altimetría satelital ICESat-2; aplicado en un río de llanura, no en torrenteras andinas peruanas.
Cifuentes-Herrera et al.	2025	Gestión integrada de recursos hídricos bajo enfoque de servicios ecosistémicos en la microcuenca Chimulala, Perú.	Enfoque socioecológico y cualitativo; no modela caudales ni inundaciones.
Chissende et al.	2025	Susceptibilidad a inundación fluvial mediante morfometría de cuencas y proceso analítico jerárquico (AHP) en el río Bahe.	Análisis morfométrico sin simulación hidrodinámica; no estima profundidades ni velocidades de flujo.

Continúa en la siguiente hoja

Cuadro 1: Comparación analítica de antecedentes internacionales sobre modelación hidrológica e hidráulica de inundaciones fluviales (2019–2026) (Continued)

Autor(es)	Año	Aporte principal	Brecha/limitación identificada
Enu et al.	2025	Análisis por escenarios con TELEMAC-2D empleando humedales como solución basada en la naturaleza; reducción significativa del área inundada.	Centrado en infraestructura verde; sin calibración del coeficiente de Manning para ríos andinos peruanos.
Araña-Ruedas et al.	2025	Mapeo de zonas propensas con SIG y morfometría en la cuenca del Mantaro, Perú; 74.38 % de susceptibilidad alta a muy alta en 18 subcuencas.	Solo morfometría y SIG; no realiza modelación hidráulica 2D ni escenarios por periodo de retorno.
Abouelsaad et al.	2024	Calibración automática de Manning con optimización Dual-Annealing; comparación HEC-RAS 1D vs. TELEMAC-2D con errores de 4 y 7 cm (río Nilo).	Enfocado en dispersión de contaminantes en río de llanura; no evalúa crecidas torrenciales de montaña.
Yan et al.	2024	Modelo hidrodinámico acoplado 1D–2D con método de proyección mejorado; mapa de riesgo urbano en cinco niveles.	Contexto de drenaje pluvial urbano; no aborda ríos de montaña ni periodos de retorno de diseño.
Godara et al.	2024	Comparación TELEMAC-2D vs. HEC-RAS 2D con técnica Rain-on-Grid; NSE de 0.70–0.90 y TELEMAC-2D cinco veces más rápido (Noruega).	Cuenca noruega; válido solo para tormentas simples menores a 15 h; sin múltiples periodos de retorno.
Torrefranca et al.	2024	Caracterización morfométrica con SIG de las cuencas de Bohol, Filipinas.	Solo morfometría; sin modelación hidráulica ni mapas de inundación.
Blöschl et al.	2024	Mapas nacionales de amenaza a 2 m de resolución sobre 38 000 km de cauces, resueltos con 10 GPU (Austria).	Escala nacional automatizada con recursos computacionales masivos; no orientado a un estudio de cuenca local.
Vashist y Singh	2023	HEC-RAS 2D en el río Krishna con DEM de 12.5 y 30 m; extensión inundada de 322.49 km^2 y velocidad máxima de 2.65 m/s.	Emplea HEC-RAS 2D (no TELEMAC-2D); modela un evento histórico único, no periodos de retorno.
Sutradhar y Mondal	2023	Priorización de subcuencas del río Ajay (India) mediante parámetro compuesto morfométrico (C_p).	Solo morfometría; sin simulación hidrodinámica ni estimación de profundidades.
Joy et al.	2023	Morfometría con SIG y teledetección en el delta del Ganges, Bangladesh; índice hipsométrico de 0.49 y forma elongada.	Solo caracterización morfométrica; sin modelación de la inundación.
Cárdenas-Mercado et al.	2023	Integración HEC-HMS + HEC-RAS con variables sociohidrológicas (Colombia).	Usa HEC-RAS (no TELEMAC-2D); contexto urbano, no cuenca andina de montaña.
Yang et al.	2023	Red LSTM acoplada a un modelo numérico 1D–2D; $R^2 > 0{,}95$ y cálculo reducido de horas a segundos (Zhoukou, China).	Inundación pluvial urbana; sin aplicación a ríos andinos ni datos peruanos.

Continúa en la siguiente hoja

Cuadro 1: Comparación analítica de antecedentes internacionales sobre modelación hidrológica e hidráulica de inundaciones fluviales (2019–2026) (Continued)

Autor(es)	Año	Aporte principal	Brecha/limitación identificada
Moghim y Mohammadi	2023	Revisión comparativa del desempeño de modelos hidrológicos e hidráulicos según NSE, RMSE y R^2.	Estudio de revisión; no aplica la modelación a una cuenca específica.
Godara et al.	2023	TELEMAC-2D con Rain-on-Grid y método SCS-CN; NSE de 0.73–0.88 con malla de 104 566 celdas (Noruega).	Cuenca noruega; eventos de corta duración; sin periodos de retorno ni datos peruanos.
Li et al.	2022	TELEMAC-2D integrado con análisis multiíndice AHP; error de 2 cm y 12 escenarios de precipitación por periodo de retorno (Shenzhen, China).	Contexto urbano costero; no ríos de montaña andinos.
Ismail et al.	2022	Análisis morfométrico cuantitativo con SIG y clasificación de la respuesta hidrológica por parámetro compuesto.	Solo morfometría; sin modelación hidrodinámica.
Broich et al.	2020	TELEMAC-2D como modelo lluvia-escorrentía (HDRRM) con SCS-CN; calibrado y validado en la crecida repentina de Baviera (Alemania).	Cuenca alemana; enfoque en un evento; sin periodos de retorno ni contexto andino.
Mazer et al.	2020	HEC-HMS + HEC-RAS para el peligro por flujos torrenciales en quebradas de Arequipa, Perú.	Emplea HEC-RAS (no TELEMAC-2D); enfoque en flujos de detritos en cauces urbanos.
Kaveh et al.	2019	Redes neuronales artificiales integradas en TELEMAC-MASCARET; aceleración cercana a 200 veces con error inferior al 5 % (río Aist, Austria).	Enfoque hidromorfodinámico (transporte de sedimentos); no genera mapas de inundación por periodo de retorno.
Pinos y Timbe	2019	Comparación de cuatro modelos 2D (HEC-RAS, Iber, Flood Modeller, PCSWMM) en un río andino de Ecuador; Iber 2D con el mejor ajuste.	No evalúa TELEMAC-2D; solo periodos de retorno de 20 y 50 años; contexto ecuatoriano, no peruano.

Nota: Elaboración propia basada en revisión sistemática de investigaciones internacionales (2019–2026).

El análisis de los antecedentes internacionales evidencia una diversidad de enfoques para la modelación de inundaciones fluviales, que van desde el análisis morfométrico de cuencas con sistemas de información geográfica (SIG) y la modelación hidrológica de tipo lluvia-escorrentía, hasta la simulación hidrodinámica bidimensional y, de manera más reciente, el aprendizaje automático. No obstante, se identifican brechas que justifican la presente investigación:

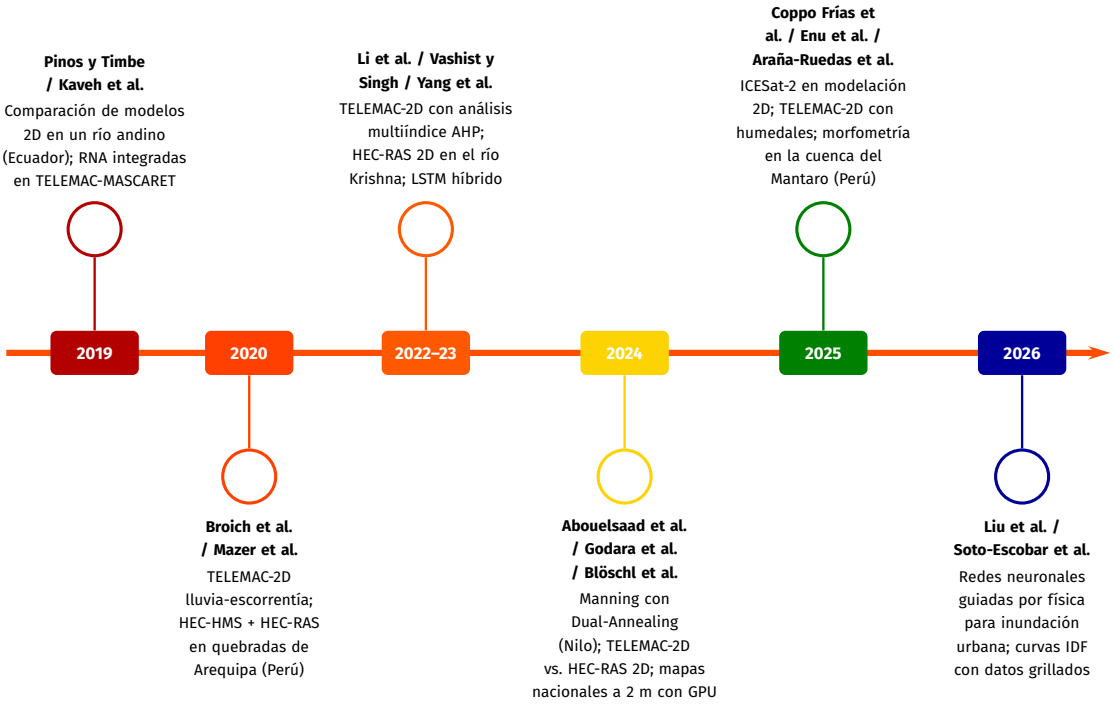
- Un grupo mayoritario de estudios se concentra en el análisis morfométrico con SIG para clasificar la susceptibilidad a inundación (Arana-Ruedas et al., 2025; Chissende et al., 2025; Ismail et al., 2022; Joy et al., 2023; Sutradhar & Mondal, 2023; Torrefranca & Otadoy, 2024), sin cuantificar profundidades, velocidades ni extensiones de

inundación mediante simulación hidrodinámica. Los trabajos que sí simulan el flujo rara vez integran la modelación hidrológica (HEC-HMS) con la hidráulica bidimensional (TELEMAC-2D) en una cadena completa lluvia-escorrentía-inundación aplicada a una cuenca específica.

- Los casos de estudio se concentran en ríos de China, Egipto, India, Austria, Noruega y Ecuador. Los escasos antecedentes peruanos —la cuenca del Mantaro (Arana-Ruedas et al., 2025), las quebradas de Arequipa (Mazer et al., 2020) y la microcuenca Chimulala (Cifuentes-Herrera et al., 2025)— no aplican modelación hidrodinámica 2D con TELEMAC-2D por periodos de retorno en un río andino.
- Predomina el uso de HEC-RAS 2D (Cardenas-Mercado et al., 2023; Mazer et al., 2020; Vashist & Singh, 2023b); el empleo de TELEMAC-2D (método de elementos finitos), más apto para representar la geometría irregular y la alta pendiente de los ríos de montaña, se restringe a contextos urbanos, de llanura o extranjeros (Broich et al., 2020; Enu et al., 2025; Godara et al., 2023; Li et al., 2022).
- La mayoría de los estudios modela eventos históricos únicos (Broich et al., 2020; Vashist & Singh, 2023b) en lugar de múltiples periodos de retorno de diseño (Tr 25, 50, 100, 140, 200 y 500 años), indispensables para el dimensionamiento de obras de protección ribereña.
- Los esquemas de aprendizaje automático aceleran la predicción de crecidas (Liu, Zheng et al., 2026; Liu, Zheng et al., 2026; Yang et al., 2023), pero exigen grandes volúmenes de datos de entrenamiento y sustituyen al modelo físico, lo que resulta inviable en cuencas andinas con escasa instrumentación hidrométrica como la del río Pongora.
- La calibración del coeficiente de rugosidad de Manning para ríos andinos, con lechos gruesos y alta rugosidad, es escasa; los trabajos de calibración automática se han aplicado a ríos de llanura (Abouelsaad et al., 2024), sin abordar las condiciones de un cauce de montaña como el estudiado.

Figura 1

Evolución cronológica de las investigaciones sobre modelación hidrológica e hidráulica de inundaciones fluviales



Nota. Elaboración propia basada en revisión sistemática de investigaciones internacionales (2019–2026).

2.1.2. Investigaciones nacionales y latinoamericanas

En el contexto de la investigación hidrológica e hidráulica peruana orientada a la gestión del riesgo por inundaciones fluviales, múltiples estudios han abordado la modelación de crecidas y la evaluación del peligro en cuencas andinas y amazónicas mediante software especializado. Estos antecedentes conforman el sustento empírico nacional que documenta las metodologías, los caudales de diseño y el comportamiento hidráulico de los ríos peruanos bajo los lineamientos del CENEPRED y del Manual de Hidrología del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, y evidencian el predominio de los modelos HEC-RAS e Iber frente al escaso empleo del modelo TELEMAC-2D en la representación de ríos de montaña. El Cuadro 2 sintetiza los hallazgos más relevantes de esta revisión.

Aguilar Torres (2025) compararon los modelos HEC-RAS e Iber con fines de prevención de inundaciones en el río Tambo, sector Ayanquera, Arequipa. Estimaron los caudales máximos con HEC-HMS mediante el hidrograma unitario del SCS. Para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años obtuvieron caudales de 650.10, 922.30 y 1179.30 m^3/s. Con HEC-RAS registraron calados de 0 a 4 m, velocidades de 0 a 5 m/s y cotas de 221 a 256.2 m; con Iber, calados de 0 a 4.20 m, velocidades de 0 a 5.38 m/s y cotas de 225.31 a 259.81 m. Concluyeron que Iber ofrece mayor precisión en geometrías irregulares y propusieron un dique enrocado de 4.50 m de altura.

Bautista Cabrera y Zuluaga Isuiza (2025) evaluaron las zonas de inundación ante el

incremento de caudal mediante modelamiento hidrodinámico en la comunidad de Yoyato, Satipo, Junín. Emplearon el software Iber para simular el flujo bidimensional superficial en una zona de topografía plana. Estimaron láminas de inundación de 1.5 m y 0.5 m para periodos de retorno de 140 y 36 años. Propusieron defensas ribereñas dimensionadas con criterios de estabilidad, capacidad de conducción y compatibilidad con el entorno. Alinearon la propuesta con los lineamientos del SINAGERD para fortalecer la resiliencia comunitaria.

Huamani Escalante y Monago Tarazona (2025) modelaron numéricamente el flujo de escombros en la cuenca del río Toro, Chanchamayo, con el software Flo-2D. Determinaron los parámetros reológicos a partir de calicatas y calibraron el modelo con las huellas hídricas del cauce. Obtuvieron tirantes máximos de 2.349 a 3.820 m, velocidades de 4.738 a 6.078 m/s y fuerzas de impacto de 139.095 a 349.968 kN/m. Los volúmenes de flujo variaron de 2.422 a 3.220 Mm^3 para caudales líquidos de 77.70 a 208.00 m^3/s en periodos de retorno de 20 a 200 años. Concluyeron que los factores geomorfológicos e hidrológicos desencadenan el flujo de escombros hacia la desembocadura con el río Chanchamayo.

Rodas Soto (2024) modelaron la peligrosidad ante máximas avenidas en la quebrada Hatunhuayco, Cusco, con el software HEC-RAS 6.4. Derivaron las tormentas de diseño con el hietograma de Dick Peschke para una duración de 6 horas. Simularon flujos de escombros con concentraciones volumétricas del 40 % al 70 %. Validaron el modelo con un evento de flujo de detritos ocurrido en 2022. Demostraron que un muro de encauzamiento de 155 m de longitud y 1.5 m de altura mitiga el riesgo asociado.

Tenorio Chilcón y Vidarte Romero (2024) analizaron la socavación local de los puentes Cementerio y Oscar Burga sobre el río Chotano con los modelos HEC-RAS 6.5 e Iber 3.3.1. Procesaron levantamientos topográficos de dos tramos, el análisis de suelos y el estudio hidrológico. Modelaron para periodos de retorno de 100 y 500 años. Determinaron niveles de socavación altos, con riesgo de inestabilidad estructural en el puente Cementerio. Concluyeron que ambos modelos resultan apropiados para el cálculo de la socavación, sin diferencias significativas entre sus resultados.

Altamirano Pariona (2024) evaluaron el riesgo de inundación en la localidad de Ccayarpachi, Santiago de Pischa, Huamanga, con la metodología del CENEPRED. Integraron información de INGEMMET, INEI y SENAMHI para elaborar los mapas de geología, geomorfología, pendientes y precipitaciones. Levantaron el plano catastral con datos de la municipalidad distrital. Identificaron 22 lotes en riesgo muy alto (9.44 %), 174 en riesgo alto (84.55 %) y 14 en riesgo medio (6.01 %). Recomendaron medidas de control estructural y no estructural para mitigar el riesgo.

Felix Pahuara (2023a) evaluaron el riesgo por inundación fluvial en la cuenca del río Pongora, comunidad de Pongora, Ayacucho, con la metodología del CENEPRED. Determinaron la susceptibilidad a partir de los factores condicionantes (geología, geomorfología y pendiente) y del factor desencadenante (precipitación). Cruzaron la susceptibilidad con el periodo de retorno para obtener el peligro y sus niveles.

Construyeron el mapa de vulnerabilidad mediante encuestas de las dimensiones social y económica. Obtuvieron un riesgo muy alto en el 6 %, alto en el 7 %, medio en el 26 % y bajo en el 61 % de las viviendas analizadas, con 5.3 hectáreas de cultivo afectadas.

Ramos Ventura (2023) simularon el comportamiento hidrológico e hidráulico del río Yucay en el sector Pamparque, Acos Vinchos, Ayacucho. Calcularon las máximas avenidas con HEC-HMS 4.2.1, obteniendo 284.60, 328.80 y 375.80 m^3/s para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años. Elaboraron el mapa del coeficiente de Manning y el modelo digital de elevación en formato shapefile. Determinaron las áreas de inundación y los tirantes máximos con HEC-RAS 6.1 para el periodo de diseño de 100 años. Diseñaron defensas ribereñas con gavión tipo I entre las progresivas 0+000 y 0+820 para controlar las inundaciones simuladas.

Muñoz Izaguirre y Hernandez Gutierrez (2023) desarrollaron un análisis hidrodinámico comparativo entre los modelos HEC-RAS e Iber para delimitar las zonas de inundación del río Reque, en un tramo de 4 km del distrito de Reque, Lambayeque. Contrastaron la extensión de la inundación y los parámetros hidráulicos obtenidos por ambos programas. Orientaron el estudio a la prevención del riesgo en la cuenca del río Chancay. Concluyeron sobre la conveniencia de cada modelo según la geometría del cauce.

Vargas Yana (2023) compararon los modelos hidráulicos HEC-RAS e Iber para la zonificación de áreas inundables en el distrito de Lucre, Quispicanchis, Cusco, en la cuenca del Huatanay (3665.45 km^2 y perímetro de 128.78 km). Estimaron caudales máximos de 88 m^3/s y 118 m^3/s para periodos de retorno de 50 y 100 años. Resolvieron HEC-RAS mediante diferencias finitas e Iber mediante volúmenes finitos. Concluyeron que HEC-RAS entrega resultados con cerca de una hora menos de cómputo. Determinaron que Iber representa mejor los ríos de comportamiento meándrico.

García Castro (2023) estimaron los caudales máximos del río Chira mediante los métodos estadísticos de Gumbel y Pearson tipo III. Completaron los registros de la estación hidrométrica Puente Sullana por regresión lineal con la estación Ardilla en el software HidroEsta 2. Aplicaron la prueba de bondad de ajuste para seleccionar el método más representativo. Para un periodo de retorno de 100 años obtuvieron 6057.34 m^3/s con Gumbel y 6029.44 m^3/s con Pearson tipo III. Señalaron que el caudal máximo de diseño constituye un dato técnico para el diseño de defensas ribereñas.

Canchari Ramos (2022) evaluaron el riesgo por inundación en la quebrada Islachayoq, ciudad de Huamanga, empleando técnicas fotogramétricas. Realizaron levantamientos con dron para generar la ortofoto y las curvas de nivel de la zona. Caracterizaron el peligro de inundación en un sector densamente poblado y en constante crecimiento. Concluyeron que la quebrada presenta peligro por ocupar el antiguo cauce de las aguas de lluvia. Recomendaron medidas para reducir el riesgo y evitar futuras pérdidas económicas y de vidas.

Del Águila y Mejía (2021) caracterizaron morfométricamente el drenaje de dos cuencas altoandinas de Junín, Perú, con sistemas de información geográfica: La cuenca del río Anya

y la del río Mchique. Determinaron cuencas de orden 3, con patrón dendrítico en Anya y subdendrítico en Mchique. Los bajos valores de densidad de drenaje indicaron altas tasas de infiltración. Los valores de elongación revelaron formas alargadas, con la cuenca Anya más vulnerable a inundaciones repentinas. Concluyeron que el factor topográfico señala pendientes pronunciadas y una mayor intensidad de los procesos erosivos.

Belizario Quispe y Pancca Cruz (2020) compararon el comportamiento hidráulico de zonas inundables con Iber y HEC-RAS en la cuenca baja del río Coata, C.P. Almosanche, Puno. Levantaron 3.4 km de topografía y determinaron los parámetros geomorfológicos con SIG. Ajustaron las precipitaciones máximas con la prueba de Smirnov-Kolmogorov y calcularon los caudales máximos con HEC-HMS. Identificaron las zonas inundables y analizaron la varianza de las áreas para distintos periodos de retorno. Concluyeron que HEC-RAS conviene en ríos de geometría simple, mientras que Iber representa mejor las geometrías de mayor irregularidad.

Paucar Ordoñez (2019) aplicaron y calibraron el modelo hidrológico HEC-HMS en la cuenca del río Vilcanota, Cusco. Realizaron el análisis regional de frecuencia de la precipitación máxima diaria con 27 estaciones y el método de los momentos lineales, para periodos de retorno de 2 a 1000 años. Conformaron dos regiones homogéneas (Nor-Oeste y Sur-Este) mediante análisis de conglomerados, con mejor ajuste de las distribuciones GEN Logistic y GEV. Verificaron el método SCS Curve Number para las pérdidas, el hidrograma de la SCS para la transformación lluvia-escorrentía y la constante mensual para el flujo base. Obtuvieron altos coeficientes de correlación y de eficiencia al contrastar con tres estaciones hidrométricas.

Sequeiros Cuba y Farfán Encalada (2019) evaluaron el riesgo por inundación de la población ribereña al río Qochoq, Calca, Cusco, con el modelo Iber. Ajustaron las precipitaciones máximas con HidroEsta 2 y calcularon los caudales con HEC-HMS: 84.17, 117.04 y 202.63 m^3/s para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años. Modelaron los tirantes y las velocidades, y clasificaron el peligro según la metodología del CENEPRED. Determinaron que el 88 % de las edificaciones de Calca son de adobe y solo el 12 % se encuentra en buen estado. Concluyeron un nivel de riesgo de inundación medio para los periodos de retorno de 100 y 500 años, con tramos de riesgo alto en la canalización.

Huaracc Chancasanampa (2018) determinaron el nivel de riesgo por inundación en la quebrada Tarahuayco, en la ciudad de Ayacucho. Caracterizaron la cuenca urbana para obtener los datos hidrometeorológicos. Identificaron y jerarquizaron los parámetros de peligrosidad para elaborar el mapa correspondiente. Calcularon la vulnerabilidad de las edificaciones con la metodología para centros urbanos. Concluyeron que el área de estudio presenta un alto grado de vulnerabilidad y, por consiguiente, un nivel de riesgo alto.

Castillo Cruz (2017b) realizaron el modelamiento hidráulico 1D y 2D y el transporte de sedimentos para el dimensionamiento de la defensa ribereña del río Pongora, Pacaycasa, Ayacucho. Ejecutaron el tránsito hidráulico bajo flujo permanente unidimensional gradualmente variado y flujo no permanente bidimensional gradualmente variado.

Determinaron velocidades y tirantes a lo largo del tramo de estudio. Analizaron los procesos de erosión y sedimentación mediante un análisis de flujo cuasi no permanente. Eligieron el modelo que entrega valores más cercanos a la realidad para dimensionar la defensa ribereña que evita la inundación de los terrenos agrícolas.

Aquise Obregon (2017) aplicaron las ecuaciones de Saint Venant al modelamiento bidimensional de cuencas y ríos. Estudiaron la transformación de lluvia en escorrentía y el tránsito hidráulico en canales mediante la solución numérica a nivel bidimensional. Emplearon los programas libres HEC-RAS 5.0.3 e Iber 2.3.2 en un tramo de 1.5 km del río Entaz, en Pasco-Villa Rica. Contrastaron las bondades y deficiencias de ambos modelos bidimensionales. Concluyeron que la modelación numérica representa adecuadamente la geometría irregular que condiciona el flujo en cuencas y ríos.

Cuadro 2: Comparación analítica de antecedentes nacionales sobre modelación de inundaciones fluviales

Autor(es)	Año	Universidad / Institución	Región	Brecha identificada
Aguilar Torres	2025	UCSM	Arequipa (Tambo)	Compara HEC-RAS e Iber; no evalúa TELEMAC-2D ni el río Pongora
Bautista & Zuluaga	2025	UPC	Junín (Satipo)	Iber en zona amazónica de topografía plana; sin TELEMAC-2D ni cuenca andina
Huamani & Monago	2025	UNISC JSA	Junín (Chanchamayo)	Flujo de escombros con Flo-2D; no inundación fluvial con TELEMAC-2D
Rodas Soto	2024	UNMSM	Cusco (Hatunhuayco)	HEC-RAS para flujo de detritos; sin TELEMAC-2D
Tenorio & Vidarte	2024	UNACH	Cajamarca (Chota)	Socavación en puentes con HEC-RAS e Iber; no evalúa inundación por periodo de retorno
Altamirano Pariona	2024	UNSCH	Ayacucho (Ccayarpachi)	Riesgo con metodología CENEPRED; sin modelación hidrodinámica 2D
Felix Pahuara	2023	UNSCH	Ayacucho (Pongora)	Riesgo con CENEPRED en el Pongora; sin modelación hidráulica 2D con TELEMAC-2D
Ramos Ventura	2023	UNSCH	Ayacucho (Acos Vinchos)	HEC-HMS + HEC-RAS; no emplea TELEMAC-2D
Muñoz & Hernandez	2023	UPC	Lambayeque (Reque)	Compara HEC-RAS e Iber; sin TELEMAC-2D ni contexto andino
Vargas Yana	2023	UNSAAC	Cusco (Lucre)	HEC-RAS e Iber; no evalúa TELEMAC-2D
García Castro	2023	UNP	Piura (Chira)	Solo estimación de caudales (Gumbel/Pearson); sin modelación hidráulica

Continúa en la siguiente hoja

Cuadro 2: Comparación analítica de antecedentes nacionales sobre modelación de inundaciones fluviales (Continued)

Autor(es)	Año	Universidad / Institución	Región	Brecha identificada
Canchari Ramos	2022	UNSCH	Ayacucho (Islachayoq)	Fotogrametría con dron; sin simulación hidrodinámica 2D
Del Águila & Mejía	2021	UNSCH / UNALM	Junín (altoandino)	Solo caracterización morfométrica; sin modelación de inundación
Belizario & Pancca	2020	UNA	Puno (Coata)	HEC-RAS e Iber; no evalúa TELEMAC-2D
Paucar Ordoñez	2019	UNSAAC	Cusco (Vilcanota)	Solo modelación hidrológica HEC-HMS; sin modelación hidráulica 2D
Sequeiros & Farfán	2019	UNSAAC	Cusco (Calca)	Modelo Iber; sin TELEMAC-2D
Huaracc Chancasanampa	2018	UNSCH	Ayacucho (Tarahuayco)	Riesgo con enfoque CENEPRED; sin modelación hidrodinámica 2D
Castillo Cruz	2017	UNSCH	Ayacucho (Pacaycasa)	Modelación 1D-2D con HEC-RAS en el Pongora; sin TELEMAC-2D ni riesgo por periodo de retorno
Aquise Obregon	2017	UNSCH	Pasco (Villa Rica)	Ecuaciones de Saint Venant 2D con HEC-RAS e Iber; sin TELEMAC-2D

Nota: Elaboración propia basada en revisión de tesis y artículos peruanos vinculados a la modelación hidrológica e hidráulica de inundaciones (2017–2025).

El análisis de los antecedentes nacionales evidencia que la modelación de inundaciones fluviales constituye una línea de investigación consolidada en el Perú, con estudios que abarcan desde el altiplano puneño y la sierra cusqueña hasta la costa lambayecana y la selva central de Junín. No obstante, se identifican brechas que refuerzan la justificación de la presente investigación:

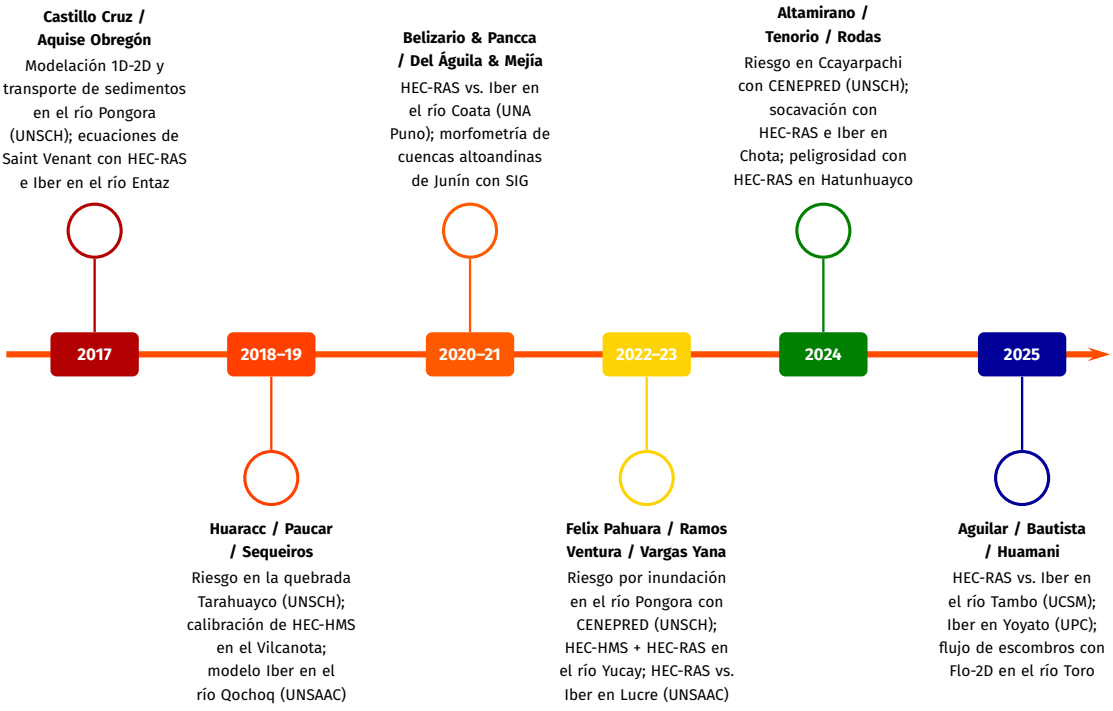
- Los antecedentes revisados emplean de forma predominante los modelos HEC-RAS e Iber (Aguilar Torres, 2025; Belizario Quispe & Pancca Cruz, 2020; Muñoz Izaguirre & Hernandez Gutierrez, 2023; Sequeiros Cuba & Farfán Encalada, 2019; Vargas Yana, 2023); ninguno aplica el modelo TELEMAC-2D, basado en el método de elementos finitos, para la representación hidrodinámica de ríos de montaña con geometría irregular.
- Los estudios previos realizados en el río Pongora abordan la evaluación del riesgo con la metodología del CENEPRED (Felix Pahuara, 2023a) o la modelación 1D-2D con transporte de sedimentos (Castillo Cruz, 2017b), pero no integran la cadena completa HEC-HMS → TELEMAC-2D con evaluación del peligro por múltiples periodos de retorno.
- Un grupo de investigaciones se limita a la caracterización morfométrica o a la estimación de caudales máximos (Del Águila & Mejía, 2021; García Castro, 2023; Paucar Ordoñez, 2019), sin ejecutar la simulación hidráulica que permite delimitar

profundidades, velocidades y extensiones de inundación.

- Los estudios de riesgo aplican la metodología del CENEPRED de manera cualitativa o semicuantitativa (Altamirano Pariona, 2024; Canchari Ramos, 2022; Huaracc Chancasanampa, 2018), sin acoplar una simulación hidrodinámica bidimensional detallada que sustente los mapas de peligro.
- La información empírica de las cuencas andinas de Ayacucho —caudales de diseño, modelos digitales de elevación y coeficientes de Manning— reportada en los antecedentes locales constituye la base sobre la cual se sustenta la modelación del río Pongora en la presente investigación.

Figura 2

Evolución cronológica de investigaciones nacionales sobre modelación de inundaciones fluviales



Nota. Elaboración propia basada en revisión de tesis y artículos nacionales (2017–2025).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Flujo en canales abiertos

2.2.1.1 Definición y fundamento

El flujo en canales abiertos es aquel que discurre en un conducto con una superficie libre sometida a la presión atmosférica. Esta condición lo diferencia del flujo a presión en tuberías y gobierna el comportamiento del agua en ríos, quebradas y canales naturales (Rocha Felices, 2007). La sistematización teórica de este tipo de flujo fue establecida por Chow (1959), cuya obra constituye la referencia canónica para la clasificación de los regímenes y el desarrollo de las ecuaciones de energía y de cantidad de movimiento en canales.

El flujo se clasifica según su variación en el tiempo y en el espacio. Respecto al tiempo, un flujo es permanente cuando sus propiedades hidráulicas en una sección dada no cambian, y no permanente cuando el tirante y la velocidad varían durante el paso de una crecida (Chow, 1959). Según su variación espacial, el flujo es uniforme cuando el tirante se mantiene constante a lo largo del canal, y variado cuando cambia entre secciones. El flujo variado se subdivide en gradualmente variado, donde el cambio del tirante ocurre de forma progresiva, y rápidamente variado, donde se produce en distancias cortas como en un resalto hidráulico (Rocha Felices, 2007). Durante una avenida, el cauce de un río de montaña como el Pongora se comporta bajo un régimen no permanente y gradualmente variado, condición que determina la elección del modelo hidrodinámico.

2.2.1.2 Ecuación de la energía

El teorema de Bernoulli aplicado a un canal abierto expresa que la energía total en una sección, referida al fondo del canal, es la suma de la energía de posición, la energía de presión asociada al tirante y la energía cinética (Rocha Felices, 2007). Para un flujo gradualmente variado, la energía específica en una sección se expresa como:

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \tag{1}$$

donde E es la energía específica, y el tirante, v la velocidad media y g la aceleración de la gravedad. El concepto de energía específica permite identificar la profundidad crítica y sustenta el análisis de las transiciones del flujo entre regímenes (Chow, 1959).

2.2.1.3 Clasificación del régimen de flujo

El estado del flujo queda determinado por la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales, cuantificada mediante el número de Froude (Ponce, 2014). Este parámetro adimensional se define como:

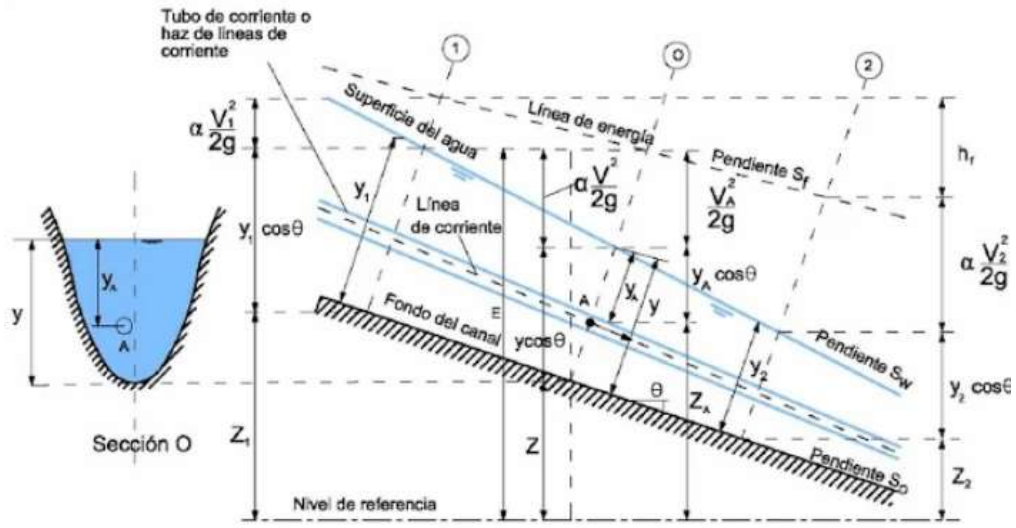
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g\,d}} \tag{2}$$

donde d es el tirante hidráulico. Cuando $Fr < 1$ el flujo es subcrítico y está controlado por las condiciones de aguas abajo; cuando $Fr = 1$ el flujo es crítico; y cuando $Fr > 1$ el

flujo es supercrítico, condición en la que las perturbaciones no pueden propagarse hacia aguas arriba (Ponce, 2014). Los ríos de montaña con pendientes pronunciadas tienden a presentar tramos en régimen supercrítico o en transición, lo que condiciona el tratamiento numérico del modelo y la definición de las condiciones de contorno. El Cuadro 3 sintetiza esta clasificación.

Figura 3

Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos



Nota. Tomado de Chow (1994).

Cuadro 3

Clasificación del flujo en canales abiertos.

Criterio	Tipo de flujo	Descripción
Variación temporal	Permanente	Las propiedades hidráulicas en una sección no cambian con el tiempo.
Variación temporal	No permanente	El tirante y la velocidad varían durante el paso de una crecida.
Variación espacial	Uniforme	El tirante permanece constante a lo largo del canal.
Variación espacial	Gradualmente variado	El tirante cambia de forma progresiva entre secciones.
Variación espacial	Rápidamente variado	El tirante cambia bruscamente en distancias cortas.
Régimen (Fr)	Subcrítico	$Fr < 1$; el flujo es controlado por las condiciones de aguas abajo.
Régimen (Fr)	Crítico	$Fr = 1$; estado de mínima energía específica.
Régimen (Fr)	Supercrítico	$Fr > 1$; las perturbaciones no se propagan hacia aguas arriba.

Nota. Elaboración propia basada en Chow (1959), Rocha Felices (2007) y Ponce (2014).

2.2.2. Ecuación de Manning y coeficiente de rugosidad

2.2.2.1 Definición y fundamento

La resistencia al flujo que oponen las paredes y el fondo de un cauce natural se cuantifica mediante el coeficiente de rugosidad de Manning. Este parámetro sintetiza el efecto de la granulometría del lecho, la vegetación de las riberas, la sinuosidad del cauce y las irregularidades de la sección sobre la velocidad del flujo (Rocha Felices, 2007). La ecuación de Manning relaciona la velocidad media con las características geométricas e hidráulicas del canal:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \tag{3}$$

donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning, R el radio hidráulico y S la pendiente de la línea de energía. Esta formulación 1D se emplea en la presente investigación exclusivamente para estimar la cota de salida del dominio mediante tirante normal (frontera de salida, sección 3 aplicada a la sección transversal de salida); en el resto del dominio bidimensional, la fricción de Manning se incorpora nodo a nodo dentro de las ecuaciones de Saint-Venant 2D resueltas por TELEMAC-2D, sin recurrir al radio hidráulico de una sección completa. El coeficiente n es el parámetro de calibración más sensible en la modelación hidráulica, pues controla directamente la magnitud de las velocidades y los tirantes calculados (Rocha Felices, 2007).

2.2.2.2 Comportamiento en ríos altitudinales

La estimación del coeficiente de Manning en ríos altitudinales presenta particularidades documentadas por la investigación reciente. Lamichhane et al. (2023) demostraron, mediante calibración con datos de campo en ríos del Himalaya, que el valor de n disminuye al aumentar el caudal y el tirante. Este comportamiento se explica porque, a mayores profundidades, la influencia relativa de la rugosidad del lecho sobre el flujo total decrece. Para el río Pongora, cauce de grava y cantos rodados con vegetación en las riberas, la selección del coeficiente debe considerar esta dependencia y respaldarse en los valores que establece el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje para cauces naturales (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011). El Cuadro 4 presenta valores representativos de n para distintas coberturas presentes en la cuenca.

Cuadro 4
Valores del coeficiente de rugosidad de Manning según el tipo de cobertura del cauce y la llanura de inundación.

Tipo de cobertura	*n*	Descripción
Cauce principal	0,040	Cauce de grava con cantos rodados y presencia de rocas.
Cultivo	0,045	Cultivos en línea en fase de madurez.
Vegetación densa	0,080	Zona arbórea con ramas de gran crecimiento.
Eriaza	0,020	Terreno con escasa vegetación.
Ribera con vegetación	0,065	Márgenes con matorral y vegetación herbácea.

Nota. Elaboración propia basada en Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2011) y Lamichhane et al. (2023).

2.2.3. Flujo gradualmente variado

2.2.3.1 Definición y formulación

El flujo gradualmente variado describe la situación en que el tirante del agua cambia de manera progresiva a lo largo del canal, sin las discontinuidades bruscas propias del flujo rápidamente variado (Rocha Felices, 2007). La ecuación diferencial que gobierna el perfil de la superficie libre relaciona la variación del tirante con la pendiente del fondo, la pendiente de fricción y el número de Froude (Jan, 2014):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2} \tag{4}$$

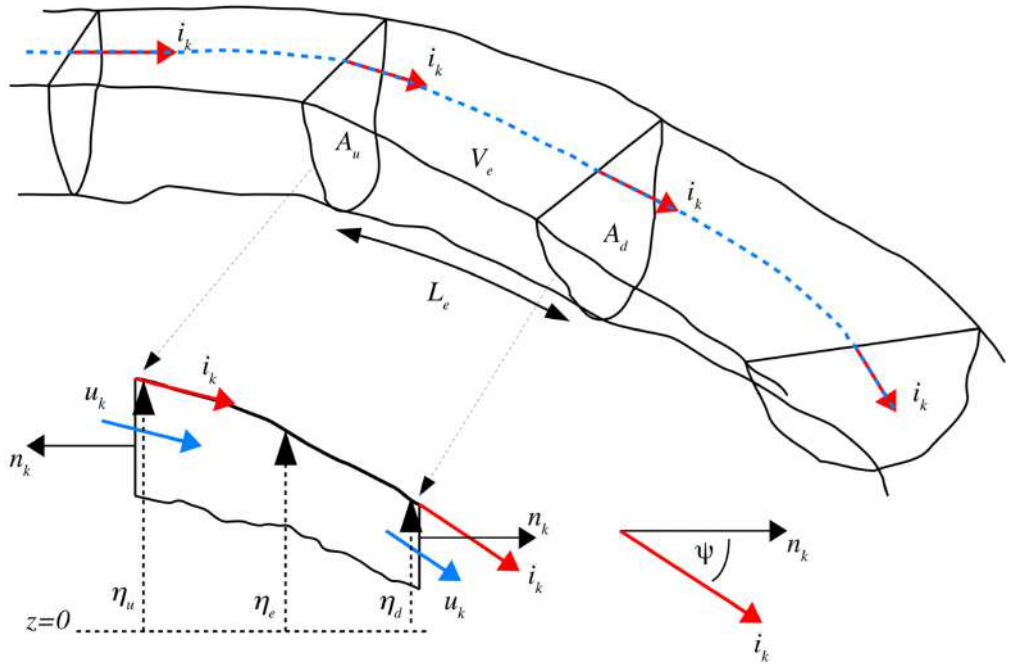
donde S_0 es la pendiente del fondo y S_f la pendiente de fricción. Jan (2014) desarrolló soluciones analíticas de esta ecuación mediante funciones hipergeométricas, formalizando la clasificación de los perfiles de superficie libre en función de la pendiente del canal y de la profundidad crítica. El análisis de estos perfiles permite anticipar el comportamiento del flujo en las transiciones del cauce y sustenta la interpretación de los resultados de la modelación bidimensional.

2.2.4. Ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales

2.2.4.1 Definición y fundamento

El comportamiento hidráulico de un río durante una crecida se representa matemáticamente mediante las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales, también denominadas ecuaciones de aguas someras. Estas ecuaciones se derivan de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en la profundidad, bajo la hipótesis de que la escala horizontal del flujo predomina sobre la vertical (Bladé et al., 2014). El sistema resultante se compone de una ecuación de continuidad, que expresa la conservación de la masa, y dos ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento en las direcciones horizontales.

Figura 4
Discretización en volúmenes finitos de las ecuaciones de Saint-Venant



Nota. Tomado de Hodges (2019).

2.2.4.2 Ecuación de continuidad

La conservación de la masa en un flujo bidimensional promediado en profundidad se expresa como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h\,u)}{\partial x} + \frac{\partial (h\,v)}{\partial y} = 0 \tag{5}$$

donde h es el tirante, y u y v son las componentes de la velocidad promediada en profundidad en las direcciones x e y. Cea y Bladé (2015) derivaron y discretizaron esta ecuación mediante un esquema de volúmenes finitos bien balanceado para aplicaciones de flujo superficial, garantizando la conservación de la masa incluso en zonas de mojado y secado.

2.2.4.3 Ecuaciones de cantidad de movimiento

Las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento incorporan los términos de aceleración local y convectiva, la fuerza gravitacional asociada al gradiente de la superficie libre, y el término de fricción de fondo. La formulación implementada en los modelos hidrodinámicos de volúmenes finitos expresa la fricción de fondo mediante la fórmula de Manning (García-Feal et al., 2018). García-Feal et al. (2018) resolvieron el sistema completo de aguas someras mediante una extensión del esquema descentrado de Roe de primer y segundo orden, incorporando el término de fricción tipo Manning y validando los resultados contra software hidráulico de referencia.

2.2.4.4 Hipótesis y limitaciones

La formulación bidimensional de aguas someras se sustenta en dos hipótesis fundamentales: La distribución hidrostática de presiones, que supone despreciable la aceleración vertical del flujo, y la distribución uniforme de la velocidad en la vertical (Santillán et al., 2020). Estas hipótesis son adecuadas para la mayoría de los eventos de crecida fluvial, donde la escala horizontal del flujo domina sobre la vertical. Santillán et al. (2020) advierten, no obstante, que en canales no prismáticos y lechos con curvatura pronunciada la hipótesis hidrostática introduce errores, aunque el enfoque bidimensional permanece válido para representar la hidrodinámica de crecidas en cauces naturales.

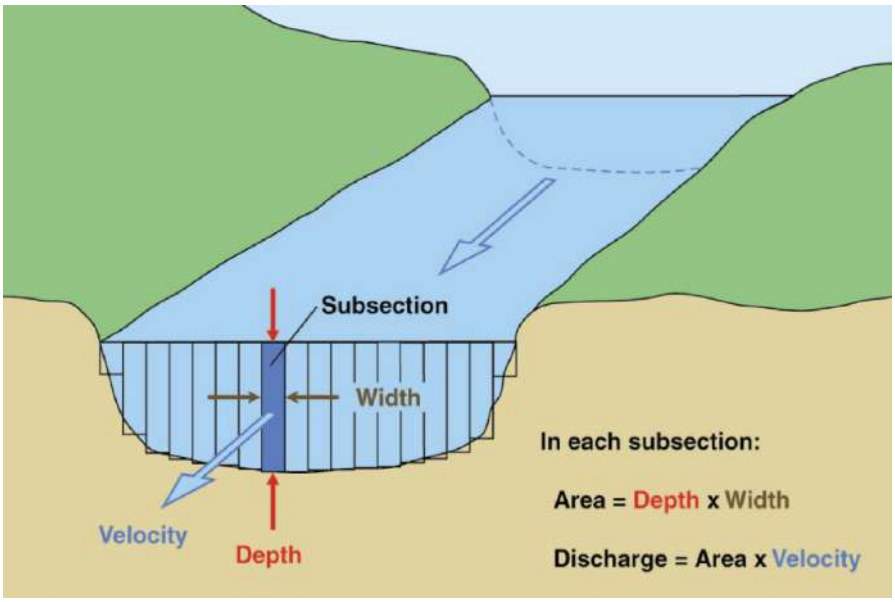
2.2.5. Parámetros del comportamiento hidráulico

2.2.5.1 Tirante y velocidad de flujo

El tirante y la velocidad son los dos parámetros primarios que describen el comportamiento hidráulico de una crecida. El tirante representa la profundidad del agua en cada punto del dominio y constituye el indicador directo de la extensión y la severidad de la inundación. La velocidad determina la capacidad de arrastre y la energía del flujo, y se relaciona directamente con la erosión de las riberas (Malik et al., 2021). Malik et al. (2021) estimaron, mediante un modelo hidrodinámico bidimensional en un río de montaña no aforado, los valores de caudal, velocidad y esfuerzo cortante de crecidas históricas, y vincularon las mayores velocidades con los eventos de erosión de márgenes más intensos. Este vínculo justifica el análisis conjunto del tirante y la velocidad en la evaluación del comportamiento hidráulico del Pongora.

Figura 5

Cálculo del caudal en una sección a partir del tirante, el ancho y la velocidad del flujo



Nota. Tomado de U.S. Geological Survey (2018).

2.2.5.2 Peligrosidad por el producto tirante-velocidad

La peligrosidad de una inundación para la vida humana y las estructuras no depende únicamente del tirante, sino de su combinación con la velocidad. Musolino et al. (2020) demostraron que el producto del tirante por la velocidad se conecta físicamente con el mecanismo de vuelco de una persona dentro del flujo, mientras que el producto del tirante por el cuadrado de la velocidad se relaciona con el mecanismo de deslizamiento. A partir de este fundamento mecánico definieron un índice de peligrosidad que permite clasificar el nivel de riesgo en cada punto del dominio inundado. Esta base sustenta el criterio de peligrosidad adoptado en la presente investigación, expresado como:

$$H = h \cdot v \tag{6}$$

donde H es el indicador de peligrosidad, h el tirante y v la velocidad del flujo.

2.2.6. Propagación de crecidas en ríos

2.2.6.1 Hidrograma de crecida

El hidrograma de crecida representa la variación del caudal en función del tiempo durante un evento de avenida, y queda caracterizado por el caudal pico, el tiempo al pico y el volumen escurrido (Aparicio Mijares, 1992). La forma del hidrograma depende de las características físicas de la cuenca y de la distribución temporal de la precipitación. Chow et al. (1988) desarrollaron los fundamentos del hidrograma unitario y del análisis del escurrimiento directo, que permiten transformar la lluvia efectiva en el caudal que ingresa al modelo hidráulico como condición de contorno.

2.2.6.2 Tránsito de avenidas

El tránsito de avenidas describe la propagación del hidrograma a lo largo del cauce, proceso durante el cual el pico se atenúa y se desplaza en el tiempo. Wang y Singh (1992) formularon el método de Muskingum con parámetros variables, obteniendo el tiempo de tránsito del tramo a partir de una simplificación de las ecuaciones de Saint-Venant. Este método distingue el tránsito hidrológico, que conserva la masa, del tránsito hidráulico, que conserva la masa y la cantidad de movimiento (Chow et al., 1988). En la presente investigación, el tránsito de las avenidas por las subcuencas se resuelve mediante el método de Muskingum dentro del modelo hidrológico, y su resultado alimenta la modelación hidráulica bidimensional.

2.2.6.3 Desbordamiento e inundación fluvial

La inundación fluvial se produce cuando el caudal de una crecida supera la capacidad del cauce principal y el agua se extiende hacia las llanuras adyacentes (Djafri et al., 2024). Este proceso se distingue de la inundación pluvial, originada por la acumulación de agua de lluvia en zonas urbanas con drenaje insuficiente. La modelación bidimensional permite representar de forma explícita la extensión del desbordamiento, el tirante y la velocidad en la llanura de inundación (Djafri et al., 2024).

2.2.6.4 Mapas de inundación por periodos de retorno

La representación cartográfica de la inundación para distintos periodos de retorno constituye la herramienta central para la gestión del riesgo. Pinos y Timbe (2019b) evaluaron el desempeño de cuatro modelos hidráulicos bidimensionales en la generación de mapas de inundación en cuencas de río de montaña de los Andes, y concluyeron que los modelos de elementos finitos y volúmenes finitos reproducen adecuadamente el nivel del agua y la extensión de la inundación para periodos de retorno de 20 y 50 años. Djafri et al. (2024) compararon el tirante, la velocidad y la extensión de las áreas de riesgo para periodos de retorno de 50, 100 y 1000 años, y obtuvieron áreas inundadas prácticamente idénticas entre los modelos evaluados, con desviaciones relativas entre el 1 y el 3 por ciento. Estos antecedentes respaldan el uso de la modelación bidimensional para la generación de los mapas de inundación del río Pongora en múltiples periodos de retorno.

2.2.7. Gestión del riesgo por inundación

2.2.7.1 Marco normativo peruano

La gestión de los recursos hídricos en el Perú se rige por la Ley de Recursos Hídricos, que en su artículo 74 define la faja marginal como el terreno aledaño a los cauces necesario para la protección, el uso primario del agua y el libre tránsito (Congreso de la República del Perú, 2009). La misma norma designa a la Autoridad Nacional del Agua como el ente rector del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos. En el ámbito del diseño hidráulico, el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje establece la metodología para la selección del periodo de retorno, el cálculo del tiempo de concentración, la determinación de la tormenta de diseño y la estimación de los caudales de avenida (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011).

Figura 6

Caracterización geoespacial de una cuenca urbana propensa a inundaciones e imágenes de eventos recientes, Kumasi (Ghana)



Nota. Tomado de Enu et al. (2025).

2.2.7.2 Criterios de peligrosidad

La evaluación de la peligrosidad por inundación en el Perú se sustenta en el Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales, que prescribe una metodología multicriterio basada en el proceso de análisis jerárquico (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014). En esta metodología, el tirante y la velocidad del flujo actúan como descriptores de la intensidad del peligro, y las capas de peligro, vulnerabilidad y riesgo se componen en cuatro niveles: Muy alto, alto, medio y bajo (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014). Estos niveles permiten traducir los resultados hidráulicos de la modelación en una zonificación del riesgo útil para la planificación territorial.

2.2.7.3 Fajas marginales y zonificación

Las fajas marginales constituyen bienes de dominio público hidráulico delimitados por la autoridad competente en función de las máximas avenidas (Autoridad Nacional del Agua, 2011). La normativa prohíbe su uso para el asentamiento humano o la actividad agrícola, lo que las convierte en el instrumento normativo directo para la zonificación del cauce a

partir de los resultados de la modelación. La delimitación de la mancha de inundación para el periodo de retorno de diseño proporciona el sustento técnico para establecer la extensión de estas fajas en el río Pongora.

2.2.7.4 Sistemas de alerta temprana

Los sistemas de alerta temprana ante inundaciones integran modelos de predicción hidrológica e hidráulica con protocolos de comunicación del riesgo. Byaruhanga et al. (2024) identificaron, en una revisión sistemática de la evolución de estos sistemas, que el acoplamiento de modelos hidrológicos, hidráulicos y de redes neuronales artificiales constituye el enfoque más utilizado por su exactitud, y señalaron el reto particular de las cuencas no aforadas o pobremente aforadas en los países en desarrollo. Esta condición es análoga a la de la cuenca del Pongora, donde la escasez de datos de aforo justifica el respaldo de la modelación numérica para la definición de escenarios de alerta.

2.2.8. Relación entre la morfometría de la cuenca y el comportamiento hidráulico

2.2.8.1 De las propiedades físicas de la cuenca a la respuesta hidrológica

Las propiedades físicas de una cuenca gobiernan la forma en que la precipitación se transforma en escorrentía y determina la magnitud de los caudales máximos. Horton (1945) estableció el sistema cuantitativo que vincula la densidad de drenaje, la razón de bifurcación y la longitud de las corrientes con la longitud crítica del escurrimiento, sentando las bases de la hidrología cuantitativa de cuencas. Strahler (1957) amplió este marco al definir propiedades adimensionales, como los números de orden, las razones de bifurcación y de longitud, la relación de relieve y la integral hipsométrica, que pueden correlacionarse con los datos hidrológicos y de producción de sedimentos por unidad de área. En cuencas andinas, la geometría, la organización de la red de drenaje y el relieve gobiernan la concentración de la escorrentía y la energía del flujo durante las lluvias intensas.

2.2.8.2 De los parámetros morfométricos al caudal de diseño

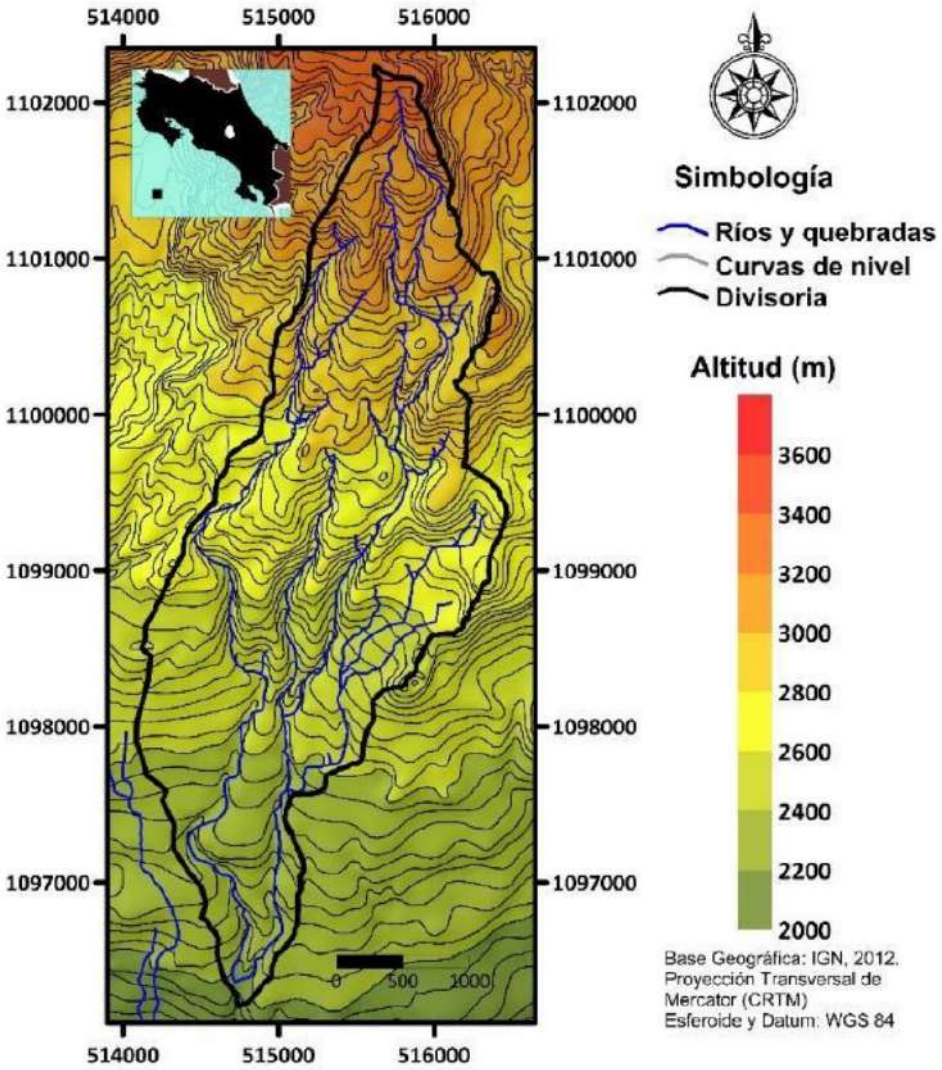
Los parámetros morfométricos permiten estimar el caudal pico en cuencas que carecen de estaciones de aforo. El-Hames (2012) desarrolló un método empírico que relaciona el caudal pico con el área de la cuenca, la pendiente y la longitud del cauce principal, combinado con el número de curva del Servicio de Conservación de Suelos, aplicable tanto a eventos individuales como a caudales asociados a periodos de retorno. Chaithong (2022) demostró, en una cuenca de montaña, la correlación entre el caudal pico y la relación de elongación, y verificó que las subcuencas de mayor susceptibilidad presentan un alto relieve, una elevada razón de relieve y una mayor frecuencia de corrientes. Estos resultados confirman que los parámetros de Horton y Strahler controlan la magnitud y el tiempo al pico del hidrograma de crecida.

2.2.8.3 Del caudal de diseño al comportamiento hidráulico

La cadena metodológica se completa cuando el caudal de diseño, obtenido a partir del análisis morfométrico e hidrológico, se introduce como condición de contorno en el modelo hidráulico bidimensional. Pérez Campomanes et al. (2026) aplicaron esta secuencia completa en una cuenca peruana, acoplando el modelo hidrológico con la modelación bidimensional para identificar las áreas propensas a la inundación en distintos periodos de retorno. Este procedimiento constituye la articulación explícita entre la morfometría de la cuenca, la respuesta hidrológica y el comportamiento hidráulico, y estructura el desarrollo metodológico de la presente investigación.

Figura 7

Ubicación y modelo de elevación de la cuenca alta del río Páez (Costa Rica)



Nota. Tomado de Ramírez-Granados et al. (2020).

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Morfometría de cuencas hidrográficas

La morfometría de cuencas es la medición y el análisis cuantitativo de las formas del relieve y de la configuración de la red de drenaje de una cuenca, con el fin de inferir su comportamiento hidrológico. El análisis morfométrico se organiza en parámetros lineales, de área y de relieve, cada uno con un significado hidrológico específico (Mangan et al., 2019). La incorporación de los sistemas de información geográfica ha transformado este análisis, pues permite derivar los parámetros directamente del modelo digital de elevación con mayor exactitud y reproducibilidad que los métodos manuales (Pande & Moharir, 2017).

2.3.2. Parámetros de forma

Los parámetros de forma describen la geometría de la cuenca y su influencia sobre la concentración del escurrimiento. El coeficiente de compacidad de Gravelius relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de igual área (Gravelius, 1914); un valor próximo a la unidad indica una cuenca circular con tendencia a producir picos de crecida súbitos. El factor de forma, propuesto por Horton (1932), vincula el área de la cuenca con el cuadrado de su longitud axial, de modo que un factor elevado corresponde a cuencas anchas con picos altos y de corta duración. La relación de elongación, definida por Schumm (1956), compara el diámetro de un círculo de igual área con la longitud máxima de la cuenca, y sus valores bajos identifican cuencas alargadas de respuesta hidrológica más lenta. El Cuadro 5 resume estos parámetros.

Cuadro 5
Parámetros morfométricos de forma y su interpretación hidrológica.

Parámetro	Símbolo	Interpretación
Coeficiente de compacidad	K_c	$K_c \geq 1$; valores próximos a 1 indican cuenca circular y mayor propensión a picos súbitos.
Factor de forma	F_f	Valores altos corresponden a cuencas anchas con picos elevados y de corta duración.
Relación de elongación	R_e	Valores entre 0,6 y 1,0; los bajos indican cuencas alargadas de respuesta lenta.

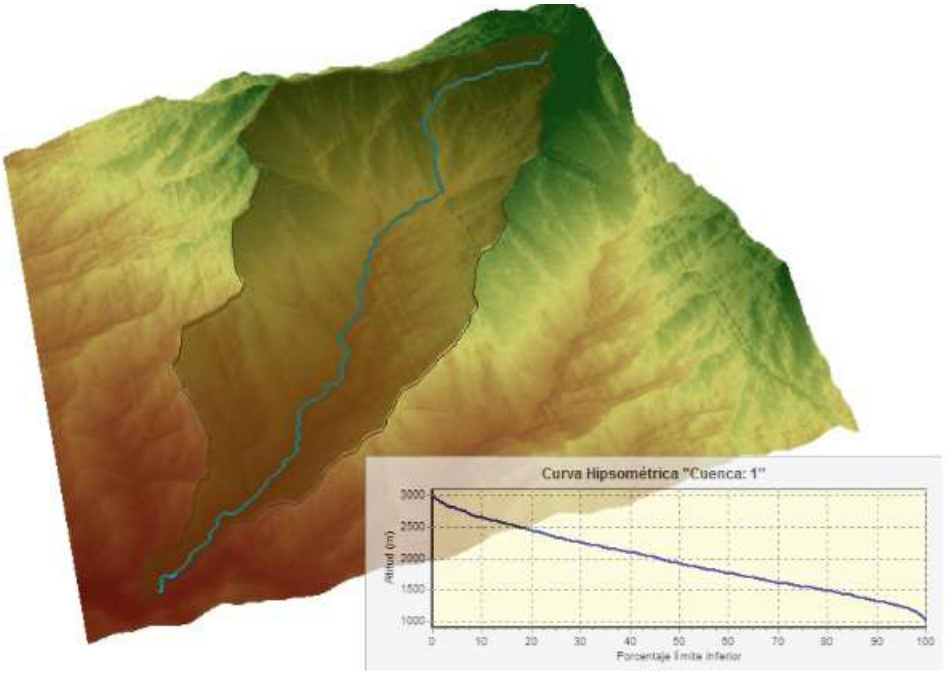
Nota. Elaboración propia basada en Gravelius (1914), Horton (1932) y Schumm (1956).

2.3.3. Parámetros de relieve

Los parámetros de relieve cuantifican la variación altitudinal de la cuenca y su efecto sobre la velocidad del escurrimiento. La curva hipsométrica, desarrollada por Strahler (1952), representa la distribución del área de la cuenca respecto a la altitud y permite clasificar su estado erosivo en juvenil, maduro o senil según la forma de la curva. La relación de relieve, que vincula el desnivel máximo de la cuenca con la longitud de su cauce principal, controla la redistribución lateral del agua y la energía disponible para el flujo (Vivoni et al.,

2008). En cuencas de montaña como la del río Pongora, un relieve pronunciado favorece tiempos de concentración cortos y caudales pico elevados.

Figura 8
Cálculo automático de parámetros morfométricos de una cuenca: Modelo de elevación y curva hipsométrica



Nota. Tomado de Acolita (2012).

2.3.4. Red de drenaje y orden de corriente

La red de drenaje es el conjunto de cauces que conducen el escurrimiento hacia el punto de salida de la cuenca. El sistema de ordenación de corrientes propuesto por Strahler (1957) asigna el orden uno a los cauces sin tributarios, y establece que la unión de dos cauces del mismo orden genera un cauce de orden inmediatamente superior. A partir de esta ordenación, Horton (1945) formuló las leyes de números y longitudes de corriente, de las cuales se deriva la relación de bifurcación como el cociente entre el número de cauces de un orden y el del orden siguiente. Valores de bifurcación entre tres y cinco indican un control estructural débil, mientras que valores mayores sugieren un fuerte control tectónico sobre la red.

2.3.5. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje es la longitud total de cauces por unidad de área de la cuenca, y constituye un indicador de la eficiencia del drenaje y de la textura del terreno. Pallard et al. (2009) demostraron que una menor densidad de drenaje implica trayectorias de flujo superficial más largas, mayor infiltración y respuestas hidrológicas más lentas con hidrogramas más planos, mientras que una densidad elevada concentra el escurrimiento con mayor rapidez y produce picos de crecida más pronunciados. Este parámetro vincula de forma directa la estructura física de la cuenca con la magnitud de los caudales máximos.

2.3.6. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es el intervalo que tarda una gota de agua en desplazarse desde el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca hasta su salida. La fórmula de Kirpich (1940), desarrollada originalmente para pequeñas cuencas de montaña, expresa el tiempo de concentración en función de la longitud del cauce principal y de su pendiente, y constituye una de las expresiones más empleadas en el diseño hidrológico. No obstante, Grimaldi et al. (2012) advirtieron que la definición del tiempo de concentración es ambigua y que las distintas fórmulas disponibles pueden arrojar valores muy diferentes, por lo que recomiendan estimarlo mediante el promedio de varios métodos y contrastar los resultados. El Cuadro 6 presenta las expresiones de uso frecuente.

Cuadro 6
Fórmulas de estimación del tiempo de concentración.

Método	Ámbito de aplicación	Variables principales
Kirpich	Pequeñas cuencas de montaña con cauce definido.	Longitud y pendiente del cauce.
Témez	Cuencas naturales de mediano tamaño.	Longitud y pendiente media.
California Culvert Practice	Cuencas de montaña, derivada de Kirpich.	Longitud y desnivel del cauce.

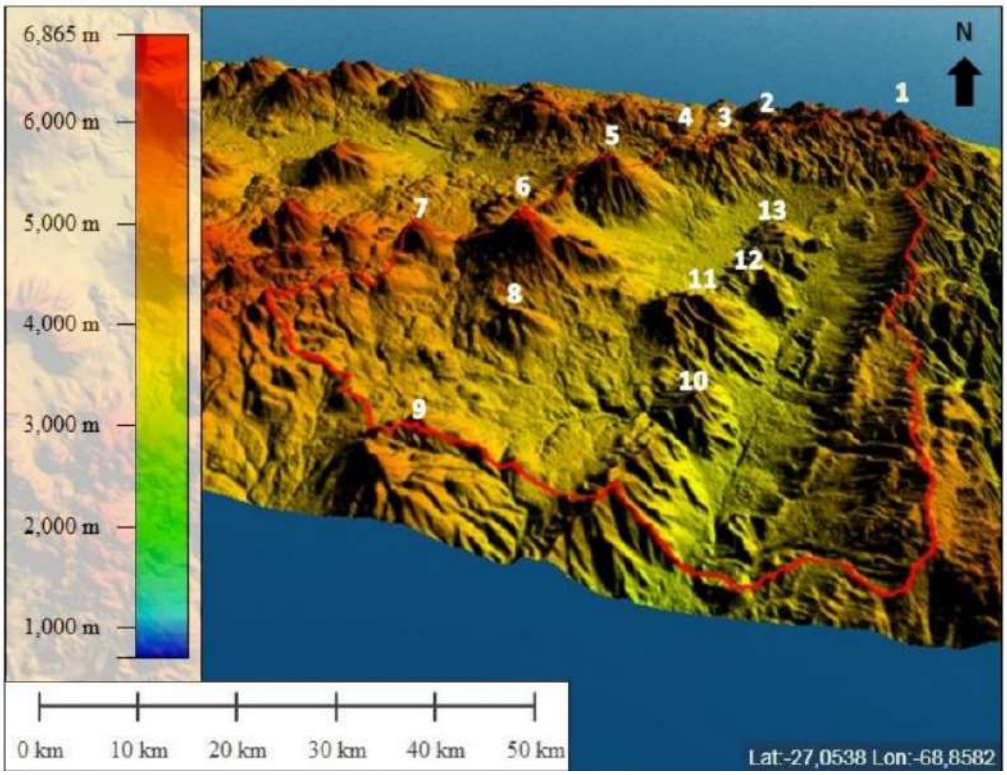
Nota. Elaboración propia basada en Kirpich (1940) y Grimaldi et al. (2012).

2.3.7. Modelo digital de elevación

El modelo digital de elevación es una representación raster de la superficie topográfica que constituye el insumo fundamental para la delimitación de la cuenca y la extracción de los parámetros morfométricos. La exactitud del modelo condiciona directamente la fiabilidad de los resultados morfométricos, por lo que la selección de la fuente es una decisión metodológica relevante (Das, 2021). Das (2021) compararon distintos modelos de acceso abierto y verificaron que los productos derivados de radar de apertura sintética, como ALOS PALSAR, y los modelos de la misión topográfica de radar, alcanzan una exactitud adecuada para el análisis morfométrico y la delimitación de cuencas.

Figura 9

Modelo digital de elevación 3D e identificación de aparatos volcánicos principales de la cuenca alta del río Chaschuil (Argentina)



Nota. Tomado de Serra et al. (2019).

2.3.8. Periodo de retorno

El periodo de retorno es el intervalo promedio de tiempo, expresado en años, en el que un evento de determinada magnitud es igualado o superado. Se define como el inverso de la probabilidad de excedencia anual y constituye la base para la selección del caudal de diseño en los estudios hidrológicos (Chow et al., 1988). La elección del periodo de retorno depende del tipo de obra y del nivel de riesgo aceptable.

2.3.9. Análisis de frecuencia de caudales

El análisis de frecuencia estima la magnitud de los caudales asociados a distintos periodos de retorno a partir del ajuste de una distribución de probabilidad a la serie de caudales máximos anuales. La distribución Log-Pearson tipo III, aplicada a los logaritmos de los caudales pico, es el estándar adoptado por las guías técnicas para el análisis de frecuencia de crecidas (England et al., 2018). La bondad del ajuste se verifica mediante pruebas estadísticas como la de Kolmogorov-Smirnov, que compara la distribución empírica con la teórica y determina la distribución más adecuada para la serie analizada.

2.3.10. Curvas de intensidad-duración-frecuencia

Las curvas de intensidad-duración-frecuencia relacionan la intensidad de la precipitación con su duración y su periodo de retorno, y constituyen el insumo para la construcción de las tormentas de diseño. En el Perú, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

ha desarrollado una metodología regional para la derivación de estas curvas, aplicable a las numerosas zonas del país que carecen de registros pluviográficos continuos (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2020). El modelo de Dick y Peschke, de amplio uso operativo en el país, permite estimar la intensidad a partir de la precipitación máxima en veinticuatro horas.

2.3.11. Método del número de curva

El método del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos estima la escorrentía directa a partir de la precipitación y de un parámetro adimensional que integra el tipo de suelo, la cobertura vegetal y las condiciones de humedad antecedente. Duque-Sarango et al. (2019) demostraron la aplicabilidad de este método en microcuencas andinas tropicales, y concluyeron que resulta adecuado para la simulación hidrológica de cuencas menores cuando se combina con las curvas de intensidad-duración-frecuencia para la construcción de los hietogramas de diseño. Este método constituye el procedimiento de transformación lluvia-escorrentía adoptado en la presente investigación.

2.3.12. Hidrograma unitario

El hidrograma unitario es la respuesta de la cuenca, expresada como hidrograma de escurrimiento directo, a una lámina unitaria de precipitación efectiva distribuida uniformemente sobre la cuenca. El concepto fue introducido por Sherman (1932) y constituye la base de la transformación lluvia-escorrentía. Cuando la cuenca carece de registros de aforo, se recurre a los hidrogramas unitarios sintéticos, que estiman la forma del hidrograma a partir de las características físicas de la cuenca (Bhunya et al., 2014). Los métodos del Servicio de Conservación de Suelos y de Snyder son los más empleados para este fin.

2.3.13. Caudal de diseño

El caudal de diseño es el caudal máximo asociado a un periodo de retorno determinado, que se adopta como referencia para el dimensionamiento de las obras hidráulicas y para la modelación del comportamiento del río. Torres-Mercado et al. (2025) calcularon, mediante modelación hidrológica, los caudales de diseño para múltiples periodos de retorno en un río andino peruano, y evaluaron su variación bajo escenarios de cambio climático. Este procedimiento, que articula el análisis morfométrico e hidrológico con la estimación del caudal, constituye la entrada fundamental para la modelación hidráulica bidimensional.

2.3.14. Modelación numérica

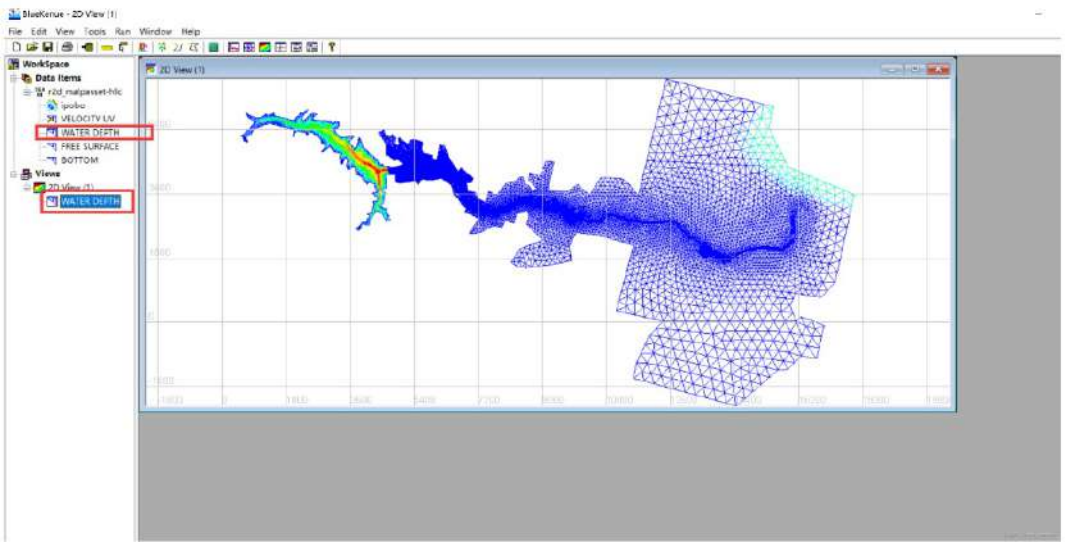
La modelación numérica es la resolución aproximada de las ecuaciones que gobiernan un fenómeno físico mediante métodos computacionales, cuando no existe una solución analítica. En hidráulica fluvial, la modelación numérica resuelve las ecuaciones de aguas someras sobre un dominio discretizado, lo que permite simular la evolución del flujo en el espacio y en el tiempo (Vreugdenhil, 1994). La discretización del dominio y la elección del esquema numérico determinan la precisión y la estabilidad de la solución.

2.3.15. Método de elementos finitos

El método de elementos finitos es una técnica de discretización que divide el dominio de cálculo en un conjunto de elementos interconectados por nodos, sobre los cuales se aproxima la solución mediante funciones de interpolación. Su aplicación a las ecuaciones de aguas someras fue formalizada por Peraire et al. (1986), quienes desarrollaron una formulación explícita que constituye la base algorítmica de los códigos hidrodinámicos de elementos finitos. La obra de referencia de Zienkiewicz et al. (2014) desarrolla el fundamento teórico completo del método aplicado a la dinámica de fluidos. La principal ventaja teórica del método de elementos finitos radica en el uso de mallas no estructuradas, que permiten representar con fidelidad la geometría irregular de los cauces naturales de montaña. Esta es una ventaja potencial derivada de la formulación del método; la presente investigación no ejecuta una comparación cuantitativa directa (misma geometría, caudal, rugosidad, condiciones de frontera y resolución) entre TELEMAC-2D y HEC-RAS o Iber, por lo que no se afirma una mayor precisión demostrada frente a esos modelos.

Figura 10

Visualización del campo de tirante sobre la malla de cálculo en Blue Kenue



Nota. Tomado de lzu_xiaoyu (2024).

2.3.16. Método de volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos discretiza el dominio en celdas sobre las que se aplica la forma integral de las ecuaciones de conservación, garantizando la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento a nivel local. Toro (2001) desarrolló los esquemas de captura de choques basados en solucionadores de Riemann, que confieren a este método una capacidad superior para representar discontinuidades del flujo como los frentes de onda y los resaltos hidráulicos. La distinción entre el método de elementos finitos y el de volúmenes finitos es relevante para la presente investigación, pues los modelos hidráulicos de uso extendido se diferencian precisamente por el método numérico que implementan

(Pinos & Timbe, 2019b).

2.3.17. Malla de discretización

La malla de discretización es la partición del dominio de cálculo en elementos o celdas sobre los que se resuelven las ecuaciones del flujo. Las mallas estructuradas se componen de elementos regulares ordenados, mientras que las mallas no estructuradas emplean elementos de geometría variable, típicamente triangulares, que se adaptan a los contornos irregulares del dominio. La malla no estructurada permite refinar localmente la resolución en las zonas de mayor interés, como el cauce principal, y emplear elementos de mayor tamaño en las llanuras de inundación, lo que optimiza el costo computacional sin sacrificar la precisión en las áreas críticas.

2.3.18. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno definen el comportamiento del flujo en las fronteras del dominio de cálculo y son indispensables para la resolución del sistema de ecuaciones. En los modelos hidráulicos bidimensionales, la condición de entrada suele imponer el caudal del hidrograma de diseño, mientras que la condición de salida prescribe el nivel del agua o una relación entre el nivel y el caudal (Dazzi et al., 2020). El tratamiento adecuado de las fronteras abiertas evita la reflexión espuria de las ondas hacia el interior del dominio, aspecto tratado desde las formulaciones débilmente reflectantes (Verboom & Slob, 1984).

2.3.19. Calibración y validación

La calibración es el proceso de ajuste de los parámetros del modelo, principalmente el coeficiente de rugosidad de Manning, hasta que los resultados simulados reproducen las observaciones disponibles, mediante un ciclo iterativo de simulación, comparación con datos observados, ajuste del parámetro y nueva simulación. La validación verifica el desempeño del modelo ya calibrado frente a un conjunto de datos independiente. Zevallos et al. (2025) aplicaron ese procedimiento de calibración del coeficiente de Manning espacialmente distribuido en un modelo hidrodinámico bidimensional de elementos finitos en un río peruano, y validaron los resultados mediante imágenes satelitales de una inundación registrada. Este trabajo constituye la referencia metodológica de lo que sería un procedimiento de calibración completo; sin embargo, la presente investigación no dispone de observaciones hidrométricas independientes del tramo del río Pongora que permitan ejecutar ese ciclo iterativo. Por ello, en este trabajo el coeficiente de rugosidad de Manning no fue calibrado en sentido estricto, sino **adoptado** a partir de valores de referencia de manuales técnicos (MTC, Chow) y de la literatura, condición que se reconoce explícitamente como limitación y como línea de trabajo futuro.

2.3.20. Sistemas de información geográfica

Los sistemas de información geográfica son entornos informáticos para la captura, el almacenamiento, el análisis y la representación de información espacial. En hidrología, constituyen la plataforma sobre la que se realiza la delimitación de cuencas, la extracción

de la red de drenaje y el cálculo de los parámetros morfométricos a partir del modelo digital de elevación (Anonymous, 2025). Su integración con los modelos hidrológicos e hidráulicos permite un flujo de trabajo continuo desde el análisis del terreno hasta la generación de los mapas de inundación.

2.3.21. ArcGIS Pro

ArcGIS Pro es el sistema de información geográfica desarrollado por el Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales, que incorpora un conjunto de herramientas hidrológicas para el procesamiento del modelo digital de elevación (Environmental Systems Research Institute, 2024). Este conjunto de herramientas ejecuta de forma secuencial el relleno de depresiones, la dirección y acumulación de flujo, la delimitación de la cuenca y la generación de la red de drenaje con su ordenación de Strahler. Su aplicación en la delimitación de cuencas y la extracción de propiedades físicas del terreno para la modelación hidrológica se encuentra ampliamente documentada (Tassew et al., 2019). En la presente investigación, ArcGIS Pro se emplea para el análisis morfométrico y la elaboración de la cartografía.

2.3.22. QGIS

QGIS es un sistema de información geográfica libre y de código abierto, desarrollado por la comunidad bajo el auspicio de la Fundación Geoespacial de Código Abierto (QGIS Development Team, 2024). Ofrece capacidades de análisis espacial, visualización y postproceso comparables a las de los sistemas comerciales, y su aplicación en el análisis morfométrico de cuencas a partir de modelos digitales de elevación se encuentra documentada en la literatura (Bhat et al., 2022). En la presente investigación, QGIS se utiliza para la visualización de los resultados de la modelación hidráulica y el postproceso de las mallas de cálculo.

2.3.23. HEC-HMS

El Sistema de Modelación Hidrológica HEC-HMS, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, simula el proceso de transformación de la precipitación en escorrentía sobre una cuenca (U.S. Army Corps of Engineers, 2023). El modelo integra métodos de cálculo de pérdidas, como el número de curva, de transformación lluvia-escorrentía, como el hidrograma unitario, y de tránsito de avenidas, como el método de Muskingum. Cabrera-Balarezo et al. (2019) validaron su aplicación en una cuenca andina de páramo, lo que respalda su uso en la región andina. En esta investigación, HEC-HMS se emplea para la obtención de los caudales de diseño que alimentan la modelación hidráulica.

2.3.24. HEC-RAS

El Sistema de Análisis de Ríos HEC-RAS, también desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica, es un modelo hidráulico de amplio uso que resuelve el flujo en una y dos dimensiones. Según su documentación oficial, el módulo bidimensional resuelve las

ecuaciones mediante un esquema de volúmenes finitos sobre una malla no estructurada (U.S. Army Corps of Engineers, 2016). Su capacidad para la generación de mapas de inundación se encuentra ampliamente documentada (Vashist & Singh, 2023a). En la presente investigación, HEC-RAS se considera como modelo hidráulico de referencia frente al método de elementos finitos adoptado.

2.3.25. TELEMAC-2D

TELEMAC-2D es el módulo hidrodinámico bidimensional del sistema de modelación TELEMAC, desarrollado por el Laboratorio Nacional de Hidráulica y Ambiente de Électricité de France. Según su documentación oficial, el modelo resuelve las ecuaciones de aguas someras mediante el método de elementos finitos sobre mallas no estructuradas compuestas por elementos triangulares (Électricité de France, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement, 2020). Esta característica lo distingue de los modelos basados en volúmenes finitos y responde directamente al objetivo de modelación numérica con elementos finitos planteado en la tesis. Su aplicación y calibración en un río peruano ha sido documentada por Zevallos et al. (2025), lo que respalda su idoneidad para la modelación del río Pongora.

2.3.26. Blue Kenue

Blue Kenue es la herramienta de preproceso y postproceso desarrollada por el Centro Canadiense de Hidráulica del Consejo Nacional de Investigación de Canadá, empleada para la generación y edición de las mallas de elementos finitos que utiliza TELEMAC-2D (National Research Council Canada, 2011). El programa permite construir la malla triangular no estructurada, asignar las condiciones de contorno y visualizar los resultados de la simulación. En la presente investigación, Blue Kenue se utiliza para la generación de la malla de cálculo del dominio modelado.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Método

La presente investigación adopta un método **deductivo**, dado que su estructura metodológica parte de teorías generales consolidadas sobre hidrología, hidráulica de canales naturales y modelación numérica para derivar la caracterización específica del comportamiento hidráulico del río Pongora. Este enfoque se fundamenta en los siguientes principios científicos validados:

- Fundamentos de la hidrología estadística: Análisis de frecuencia de las precipitaciones máximas mediante la distribución Log-Pearson tipo III y estimación de los caudales de diseño a través de la transformación lluvia-escorrentía por el método del número de curva (SCS), conforme al Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje.
- Principios de la morfometría de cuencas: Leyes de Horton y ordenamiento de la red de drenaje según Strahler, que describen la respuesta hidrológica del sistema a partir de su geometría.
- Ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant (aguas someras), resueltas mediante el método de los elementos finitos, que constituyen la base del modelo TELEMAC-2D (Broich et al., 2020; Li et al., 2022).
- Metodología del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED) para la evaluación del peligro por inundación a partir de los resultados hidrodinámicos.

La investigación procede **deductivamente** al tomar estos fundamentos teóricos universales y aplicarlos sistemáticamente al problema localizado de la evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora, en la región Ayacucho.

3.2. Orientación

La investigación se clasifica como de orientación **aplicada** porque desarrolla una solución técnica concreta la caracterización hidráulica y los mapas de inundación del río Pongora para abordar el problema específico de la gestión del riesgo por inundación en su cuenca. El estudio trasciende el ámbito teórico al generar productos funcionales que integran los siguientes componentes:

- Caracterización morfométrica de la cuenca (área, perímetro, longitud y pendiente del cauce, densidad de drenaje y orden de Strahler) a partir del modelo digital de elevación.
- Estimación de los caudales máximos de diseño para los periodos de retorno de 25, 50, 100, 140, 200 y 500 años mediante la modelación hidrológica con HEC-HMS.
- Construcción de la malla de elementos finitos en Blue Kenue e implementación del modelo hidrodinámico bidimensional TELEMAC-2D sobre el tramo de estudio.
- Generación de los mapas de tirantes, velocidades de flujo y áreas de inundación para cada periodo de retorno.

- Formulación de lineamientos técnicos que contribuyen a la gestión del recurso hídrico y a la reducción del riesgo asociado al río Pongora.

La orientación **aplicada** se confirma por el enfoque en la obtención de productos cartográficos y técnicos utilizables por la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones de Ayacucho, la municipalidad distrital y la Autoridad Nacional del Agua para el diseño de obras de protección y la planificación territorial.

3.3. Enfoque

La investigación adopta un enfoque **cuantitativo** porque se fundamenta en la recolección y el análisis de datos numéricos medibles para evaluar el comportamiento hidráulico del río Pongora. Las variables cuantificables del estudio se organizan en las siguientes categorías:

Variables de entrada:

- Precipitaciones máximas en 24 horas y precipitaciones de diseño por periodo de retorno (mm); caudales máximos de diseño (m^3/s); coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional); cotas del terreno y geometría de la malla de elementos finitos (msnm); y parámetros morfométricos de la cuenca.

Variables de salida (modelación TELEMAC-2D):

- Tirante o profundidad del flujo (m), velocidad del flujo (m/s) y extensión del área de inundación (ha) para cada periodo de retorno analizado.

Criterios y métricas de evaluación:

- Balance de masa del modelo hidrodinámico (*mass-balance*) como verificación de la conservación del caudal.
- Contraste de los caudales de diseño obtenidos con los valores oficiales del estudio hidrológico de la DRTCA (2022).
- Diferencia porcentual entre el área y la longitud de cauce calculadas por morfometría y las oficiales, como validación de la delimitación de la cuenca.
- Número de Froude para clasificar el régimen del flujo (subcrítico o supercrítico) a lo largo del tramo.

Estos valores se procesan estadísticamente y se representan cartográficamente para establecer conclusiones objetivas y replicables sobre el comportamiento hidráulico del río Pongora ante los distintos periodos de retorno evaluados.

3.4. Instrumento de recolección de datos

La presente investigación adopta un enfoque **retrolectivo**, dado que los datos no fueron generados mediante mediciones o ensayos ejecutados para este estudio, sino recopilados de fuentes documentales y bases de datos preexistentes a través de la técnica del análisis documental, empleando como instrumento una ficha de registro de datos. Este enfoque se manifiesta en tres métodos complementarios de adquisición:

- **Método 1: Registros pluviométricos del SENAMHI:** series históricas de precipitación

máxima en 24 horas de seis estaciones —Quinua, Tambillo, Cuchoquesera, Pucaloma, Chontaca y Chiara—, con registros de entre 15 y 33 años, obtenidas del portal oficial del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

- **Método 2: Modelos digitales de elevación:** el DEM ALOS PALSAR de 12.5 m de resolución (Alaska Satellite Facility) y el SRTM de 30 m, descargados de los repositorios satelitales (NASA Earthdata / OpenTopography), empleados para la delimitación de la cuenca, el análisis morfométrico y la construcción de la malla de elementos finitos.

La naturaleza **retrolectiva** del instrumento implica que los datos corresponden a mediciones y estudios ejecutados previamente por entidades oficiales (el SENAMHI, las agencias satelitales y la DRTCA), lo que garantiza la independencia entre el investigador y la generación de los datos, pero limita el control sobre las condiciones de medición y sobre las variables no reportadas en las fuentes originales.

3.5. Tipo o alcance de la investigación

La presente investigación adopta un alcance **aplicativo**, consistente con el nivel de investigación desarrollado en el apartado siguiente: No se limita a describir las características de la cuenca ni a correlacionar las variables morfométricas con el caudal, sino que recorre un componente explicativo —interpretar, a partir de la modelación numérica, cómo se relacionan la morfometría, los caudales de diseño y el comportamiento hidráulico— como paso intermedio hacia un producto aplicativo: Los mapas de peligro por periodo de retorno y los lineamientos técnicos de protección ribereña. Se precisa que este componente explicativo es interpretativo, apoyado en la coherencia física del modelo numérico y no en una prueba estadística de causalidad, dado que el diseño de la investigación es no experimental y se basa en información secundaria. El componente explicativo se manifiesta en los siguientes aspectos:

- Se interpreta cómo las características morfométricas de la cuenca (área, pendiente, forma y densidad de drenaje) son consistentes con la respuesta hidrológica y la magnitud de los caudales máximos.
- Se interpreta por qué el flujo adopta un régimen subcrítico o supercrítico a lo largo del tramo, en función de la pendiente y la geometría del cauce, mediante el número de Froude.
- Se describe la relación entre el periodo de retorno y su caudal asociado y la extensión, el tirante y la velocidad de la inundación resultante.

3.6. Nivel de investigación

La presente investigación corresponde a un nivel **aplicativo**, dado que trasciende la descripción, la correlación y la explicación de las variables para materializar los hallazgos en productos concretos los mapas de inundación por periodo de retorno y los lineamientos técnicos que sustentan la gestión del riesgo por inundación del río Pongora. El nivel aplicativo se sustenta en que la investigación atravesó los niveles previos de forma progresiva:

- A nivel **descriptivo**, se caracterizó la cuenca y el régimen pluviométrico mediante los estadísticos de las series de precipitación y los parámetros morfométricos (área ≈1 127.68 km^2, longitud de cauce ≈68.69 km, pendiente, densidad de drenaje y orden de la red según Strahler).
- A nivel **correlacional**, se relacionaron los parámetros morfométricos con la respuesta hidrológica de la cuenca y con los caudales de diseño obtenidos para cada periodo de retorno.
- A nivel **explicativo**, se identificaron las causas del comportamiento hidráulico del río el régimen del flujo y los sectores de desborde— a partir de la interacción entre el caudal, la pendiente y la geometría del cauce.
- A nivel **aplicativo**, se generaron los mapas de tirantes, velocidades y áreas de inundación para los periodos de retorno de 25, 50, 100, 140, 200 y 500 años, y se formularon los lineamientos técnicos para la reducción del riesgo (defensas ribereñas y ordenamiento territorial de las áreas próximas al cauce).

3.7. Diseño de investigación

3.7.1. Propósito de la investigación

La investigación se fundamenta en un propósito **no experimental** porque el diseño metodológico no involucra la manipulación controlada de variables por parte del investigador. El comportamiento hidráulico del río Pongora se evalúa a partir de datos preexistentes los registros pluviométricos del SENAMHI, los modelos digitales de elevación y el estudio hidrológico de la DRTCA (2022), sin que el investigador intervenga sobre el cauce ni ejecute mediciones de campo que alteren el sistema. El investigador actuó como recopilador, verificador y modelador de datos preexistentes, y no como agente que modifica las condiciones del fenómeno estudiado.

3.7.2. Número de mediciones

La investigación adopta un diseño **transversal** dado que las variables se midieron y procesaron en un único momento del estudio, capturando el estado del sistema de forma puntual y sin un seguimiento de su evolución a lo largo del tiempo. Conviene precisar que el empleo de series pluviométricas de varios años no convierte el diseño en longitudinal: Dichas series constituyen la muestra estadística sobre la que se ejecuta el análisis de frecuencia una sola vez, y no mediciones repetidas de la cuenca en distintos periodos para observar su cambio. De igual modo, los caudales asociados a los periodos de retorno de 25 a 500 años son escenarios probabilísticos simulados de manera simultánea, y no observaciones tomadas en instantes sucesivos. Un diseño longitudinal, por el contrario, exigiría caracterizar y modelar la cuenca en fechas diferentes para analizar su evolución morfológica o hidrológica, lo que excede los objetivos de la presente investigación. Los datos recolectados y procesados se utilizaron para:

- La delimitación de la cuenca y el cálculo de los parámetros morfométricos.
- El análisis de frecuencia de las precipitaciones máximas y la estimación de los

caudales de diseño (Tr = 25, 50, 100, 140, 200 y 500 años) mediante HEC-HMS.
- La construcción de la malla de elementos finitos en Blue Kenue.
- La simulación hidrodinámica bidimensional con TELEMAC-2D y la generación de los mapas de inundación.

3.7.3. Cronología de las observaciones

La investigación adopta un enfoque **retrospectivo** dado que todos los datos corresponden a registros y estudios anteriores al inicio de la investigación: Las series pluviométricas históricas del SENAMHI (de 15 a 33 años de longitud), los modelos digitales de elevación y el estudio hidrológico de la DRTCA (2022). Es decir, el investigador no recolectó mediciones hacia adelante en el tiempo, sino que analizó información ya existente. Cabe precisar que el carácter predictivo del modelo no altera esta clasificación: La dirección **retrospectiva** se refiere al origen histórico de los datos, mientras que la predicción de escenarios de inundación constituye la finalidad o aplicación del modelo. A partir de estos datos históricos, el modelo generó las siguientes capacidades predictivas:

- La simulación del comportamiento hidráulico del río para los escenarios de crecida asociados a los periodos de retorno de 25, 50, 100, 140, 200 y 500 años.
- La estimación de los tirantes, las velocidades de flujo y las áreas de inundación esperadas para cada periodo de retorno.
- La identificación de los sectores con mayor propensión al desborde a lo largo del tramo modelado.
- La provisión de un insumo técnico para el dimensionamiento de defensas ribereñas y la reducción del riesgo por inundación.

3.8. Población y muestra

3.8.1. Población

La población está constituida por el conjunto de estaciones meteorológicas del SENAMHI ubicadas en el ámbito de la cuenca del río Pongora y su área de influencia, junto con sus registros históricos de precipitación máxima en 24 horas. En el plano espacial, la población corresponde a la cuenca hidrográfica del río Pongora, con una extensión aproximada de 1 127.68 km^2 y una longitud de cauce principal de 68.69 km, según el estudio hidrológico oficial de la DRTCA (2022).

3.8.2. Muestra

La muestra está conformada por seis (6) estaciones del SENAMHI con influencia sobre la cuenca del río Pongora, de las cuales se obtuvo un total de **159 registros** de precipitación máxima en 24 horas. Este total resulta de excluir, de la serie histórica compilada en el Anexo A del estudio de la DRTCA (2022), los años en los que la estación no reportó dato (registrados por el estudio oficial como 0 mm), lo que redujo en un registro la serie de Quinua y en dos la de Pucaloma respecto al conteo bruto de años del periodo. La distribución de los registros por estación se presenta en el Cuadro 7.

Cuadro 7
Estaciones del SENAMHI que conforman la muestra y su número de registros

Estación	Altitud (m s.n.m.)	N.° de años	Registros ($P_{máx}$ 24 h)
Quinua	3 215	30	30
Tambillo	3 343	27	27
Cuchoquesera	3 724	27	27
Pucaloma	3 493	22	22
Chontaca	3 497	27	27
Chiara	3 587	26	26
Total	—	—	**159**

Nota. Elaboración propia a partir de los registros del SENAMHI, verificados contra el estudio hidrológico de la DRTCA (2022).

Estos 159 registros constituyen los datos de entrada del análisis de frecuencia mediante la distribución Log-Pearson tipo III y, a través del método de los polígonos de Thiessen, de la estimación de la precipitación areal que ingresa a la modelación hidrológica. En el plano espacial, la modelación hidráulica se concentra en el tramo del río Pongora comprendido en un dominio aproximado de 10×10 km en torno al punto de aforo oficial del puente proyectado (583 827 m E; 8 553 291 m N, UTM WGS84 zona 18 L).

3.8.3. Tipo de muestreo

El muestreo es **no probabilístico de tipo intencional**, dado que las seis estaciones se seleccionaron según criterios técnicos y no de forma aleatoria. Los criterios de selección fueron:

- La ubicación dentro de la cuenca del río Pongora o en su entorno inmediato, de modo que las estaciones aporten al polígono de Thiessen que caracteriza la precipitación sobre la cuenca.
- La longitud y continuidad de la serie histórica de precipitación máxima en 24 horas (de 15 a 33 años), suficiente para el análisis de frecuencia.
- La superación de las pruebas de consistencia y de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov bajo la distribución Log-Pearson tipo III.
- La disponibilidad de cobertura topográfica de detalle (DEM ALOS PALSAR de 12.5 m) sobre el tramo de interés, condición necesaria para la modelación por elementos finitos.

3.9. Hipótesis

3.9.1. Hipótesis general

El comportamiento hidráulico del río Pongora puede evaluarse de manera precisa mediante el análisis morfométrico de su cuenca y la modelación numérica con elementos finitos,

lo que permitirá identificar las condiciones de flujo y los riesgos asociados en la región Ayacucho.

3.9.2. Hipótesis específicas

1. Las características morfométricas de la cuenca del río Pongora influyen directamente en su dinámica hidrológica y comportamiento hidráulico.
2. La modelación numérica con elementos finitos permite representar de forma coherente y consistente el régimen de caudales y el flujo en el río Pongora bajo distintos escenarios de caudales.
3. La modelación numérica con elementos finitos constituye una herramienta válida para simular el flujo en el río Pongora.
4. Las características morfométricas de la cuenca del río Pongora guardan correspondencia con los resultados de la modelación numérica, de modo que la caracterización física de la cuenca es consistente con el comportamiento hidráulico simulado, sin que ello implique una relación causal demostrada estadísticamente.
5. Los resultados de la evaluación hidráulica permiten plantear lineamientos técnicos útiles para la gestión del recurso hídrico y la prevención de riesgos.

3.10. Operacionalización de variables

3.10.1. Variables

- **Variable independiente (X): Análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos.** Constituye el conjunto de procedimientos de caracterización de la cuenca y de simulación del flujo que se emplean como medio para evaluar el comportamiento hidráulico del río Pongora. Comprende el análisis morfométrico —la descripción cuantitativa de la forma, el relieve y la red de drenaje de la cuenca a partir del modelo digital de elevación en un entorno SIG— y la modelación numérica bidimensional mediante el método de los elementos finitos, implementada en el modelo TELEMAC-2D y alimentada por los caudales de diseño obtenidos con HEC-HMS.
- **Variable dependiente (Y): Comportamiento hidráulico del río Pongora.** Representa la respuesta del flujo del río ante los caudales de diseño, expresada en los parámetros hidráulicos simulados por el modelo, en la extensión de la inundación resultante y en el nivel de peligro asociado. Esta variable distingue con claridad tres planos: Lo que el modelo *simula* directamente (tirantes y velocidades), lo que se obtiene como *resultado espacial* (las áreas de inundación) y el *resultado final* orientado a la gestión (la peligrosidad por inundación).

3.10.2. Dimensiones

Las dimensiones representan los componentes específicos que conforman cada variable, permitiendo su análisis de manera más precisa y detallada (Hernández Sampieri et al., 2014).

3.10.2.1 Variable independiente (X): Análisis morfométrico y modelación numérica

- **Dimensión X1: Parámetros morfométricos de forma.** Descriptores cuantitativos de la geometría planimétrica de la cuenca (área, perímetro y su relación de compacidad), obtenidos del modelo digital de elevación mediante ArcGIS Pro.
- **Dimensión X2: Parámetros morfométricos de relieve y red de drenaje.** Descriptores del gradiente altitudinal y de la organización de la red hídrica (longitud y pendiente del cauce, densidad de drenaje y orden de la red según Strahler), obtenidos del DEM y de la red de drenaje delineada en ArcGIS Pro.
- **Dimensión X3: Modelación numérica con elementos finitos.** Conjunto de insumos y parámetros del modelo hidrodinámico (los caudales de diseño provenientes de HEC-HMS, el coeficiente de rugosidad de Manning, la resolución de la malla de elementos finitos construida en Blue Kenue y el balance de masa reportado por TELEMAC-2D). Estos elementos son **parámetros del modelo**, no descriptores morfométricos.

3.10.2.2 Variable dependiente (Y): Comportamiento hidráulico del río Pongora

- **Dimensión Y1: Parámetros hidráulicos del flujo (simulados).** Magnitudes que el modelo TELEMAC-2D calcula directamente en cada nodo de la malla para caracterizar el flujo (tirante, velocidad, número de Froude y cota de la superficie del agua).
- **Dimensión Y2: Extensión de la inundación (resultado espacial).** Descriptores espaciales de la mancha de inundación derivados del post-procesamiento de los resultados de TELEMAC-2D en un entorno SIG (área inundada, ancho de la mancha, longitud del tramo inundado y profundidad máxima).
- **Dimensión Y3: Zonas de mayor peligro por inundación (resultado final).** Identificación de las zonas de mayor peligro ante la inundación para cada periodo de retorno, a partir de los tirantes y velocidades simulados, mapeados en QGIS, y de una verificación en campo con puntos georreferenciados que confirmó la correspondencia espacial entre esas zonas y los elementos expuestos —viviendas y áreas de cultivo—. Esta identificación se realiza con base directa en los tirantes y velocidades simulados, no mediante la aplicación formal de la matriz de clasificación tirante-velocidad del CENEPRED con sus umbrales cuantitativos, cuya elaboración queda planteada como recomendación para estudios posteriores (ver Recomendaciones). Estos resultados sustentan la propuesta de medidas de protección (muros de gaviones y defensas ribereñas) del objetivo específico 5.

3.10.3. Indicadores

Los indicadores son elementos específicos y medibles que permiten cuantificar las dimensiones de las variables de estudio (Caballero Romero, 2014). Cada indicador se acompaña de su unidad de medida y de la técnica o instrumento (software) con el que se obtiene.

3.10.3.1 Indicadores de la variable independiente (X):

1. **Parámetros morfométricos de forma (X1)**
   - Área de la cuenca [km^2]
   - Perímetro de la cuenca [km]
   - Coeficiente de compacidad de Gravelius [adimensional]
   - Factor de forma [adimensional]
2. **Parámetros morfométricos de relieve y red de drenaje (X2)**
   - Longitud del cauce principal [km]
   - Pendiente media del cauce [%]
   - Densidad de drenaje [km/km^2]
   - Orden de la red de drenaje (Strahler) [adimensional]
3. **Modelación numérica con elementos finitos (X3)**
   - Caudal de diseño por periodo de retorno [m^3/s]
   - Coeficiente de rugosidad de Manning [adimensional]
   - Resolución de la malla de elementos finitos [elementos/m]
   - Balance de masa del modelo [%]

3.10.3.2 Indicadores de la variable dependiente (Y):

1. **Parámetros hidráulicos del flujo (Y1)**
   - Tirante o profundidad del flujo [m]
   - Velocidad del flujo [m/s]
   - Número de Froude [adimensional]
   - Cota de la superficie del agua [m s.n.m.]
2. **Extensión de la inundación (Y2)**
   - Área de inundación [ha]
   - Ancho de la mancha de inundación [m]
   - Longitud del tramo inundado [km]
   - Profundidad máxima de inundación [m]
3. **Peligrosidad por inundación (Y3)**
   - Nivel de peligro por inundación [bajo/medio/alto]
   - Zonas críticas de máxima peligrosidad verificadas en campo [número]
   - Áreas de cultivo expuestas [ha]
   - Viviendas o infraestructura expuestas [número]

En el Cuadro 38 se presenta la matriz de operacionalización de las variables, donde se detallan las variables, dimensiones, indicadores, unidades de medida y la técnica o instrumento de obtención de cada indicador.

3.11. Técnicas e instrumentos

3.11.1. Técnicas de investigación

La presente investigación emplea diversas técnicas especializadas para la recopilación y el análisis de datos, así como para la caracterización de la cuenca, la modelación hidrológica e hidráulica y la evaluación del peligro por inundación del río Pongora. A continuación se detallan las técnicas utilizadas:

1. **Revisión bibliográfica y documental:** Recopilación y análisis crítico de la literatura científica sobre morfometría de cuencas, modelación hidrológica lluvia-escorrentía y modelación hidráulica bidimensional por el método de los elementos finitos. La revisión abarcó fuentes indexadas en ScienceDirect, Scopus y Google Scholar —26 antecedentes internacionales y 19 nacionales—, así como la normativa peruana vigente: El Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011) y la metodología del CENEPRED para la evaluación del riesgo por inundación.
2. **Recolección documental de datos:** Obtención de las series históricas de precipitación máxima en 24 horas de seis estaciones, provenientes de la OPEMAN del Gobierno Regional de Ayacucho (con fuente original en el SENAMHI), y de los modelos digitales de elevación (ALOS PALSAR de 12.5 m y SRTM de 30 m) desde los repositorios satelitales. El estudio hidrológico e hidráulico de la DRTCA (2022) se utilizó únicamente como guía comparativa y de verificación de los caudales de diseño y de los coeficientes de Manning de referencia, no como fuente de la totalidad de los datos.
3. **Delimitación de la cuenca y análisis morfométrico:** Procesamiento del DEM en ArcGIS Pro (relleno de depresiones, dirección y acumulación de flujo, delimitación de la cuenca y ordenamiento de la red de drenaje según Strahler) y cálculo de los parámetros morfométricos de forma, relieve y red de drenaje.
4. **Análisis de frecuencia hidrológico:** Ajuste de las precipitaciones máximas con la distribución Log-Pearson tipo III en el software HidroEsta 2, verificado con la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y corregido con el factor de la OMM (1.13); generación de las precipitaciones de diseño para los periodos de retorno de 25, 50, 100, 140, 200 y 500 años, las curvas IDF por el método de Dick y Peschke, y la ponderación espacial mediante polígonos de Thiessen.
5. **Modelación hidrológica lluvia-escorrentía:** Estimación de los caudales máximos de diseño con el modelo HEC-HMS, empleando el método del número de curva (SCS) para la transformación de la precipitación en escorrentía.
6. **Construcción de la malla de elementos finitos:** Generación de la malla no estructurada del tramo de estudio en Blue Kenue a partir del DEM ALOS PALSAR, y definición de las condiciones de contorno del modelo (archivos de geometría y de condiciones de borde).
7. **Modelación hidráulica bidimensional:** Simulación del flujo con el modelo TELEMAC-2D,

que resuelve las ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant por elementos finitos, con fricción de Manning distribuida, tratamiento de zonas de secado y mojado (*tidal flats*) y verificación del balance de masa, para los caudales asociados a los periodos de retorno de 25 a 500 años.

8. **Mapeo de zonas de mayor peligro por inundación:** Post-procesamiento de los resultados de TELEMAC-2D en QGIS para elaborar los mapas de tirantes, velocidades y áreas de inundación por periodo de retorno, e identificación de las zonas de mayor peligro a partir de esos campos simulados. La clasificación formal según la matriz tirante-velocidad de la metodología del CENEPRED, con sus umbrales cuantitativos, no fue ejecutada en esta investigación y queda planteada como recomendación para estudios posteriores.
9. **Verificación de campo:** Levantamiento en campo de puntos georreferenciados con receptor GPS y registro fotográfico, para confirmar las zonas de máxima peligrosidad identificadas en el mapeo y para inventariar los elementos expuestos (viviendas, áreas de cultivo, canales de riego y estructuras existentes como el puente y los muros de gaviones).
10. **Propuesta de medidas de protección:** Formulación de lineamientos técnicos y predimensionamiento de defensas ribereñas (muros de gaviones) para los sectores de mayor peligro identificados, en correspondencia con el objetivo específico 5.

3.11.2. Instrumentos de investigación

Para la implementación de las técnicas mencionadas se utilizaron los siguientes instrumentos:

- **Fuentes documentales de datos:**
  - **OPEMAN del Gobierno Regional de Ayacucho**, de la que se obtuvieron las series históricas de precipitación máxima en 24 horas de las seis estaciones empleadas (con fuente original en el SENAMHI).
  - **Repositorios satelitales** (Alaska Satellite Facility para el DEM ALOS PALSAR de 12.5 m; NASA Earthdata / OpenTopography para el SRTM de 30 m).
  - **Estudio hidrológico e hidráulico de la DRTCA (2022)** del puente proyectado sobre el río Pongora, empleado como guía comparativa y de verificación de los caudales de diseño y de los coeficientes de Manning de referencia.
- **Normativa técnica de referencia:**
  - **Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje** del MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011), para los criterios de análisis de frecuencia, periodos de retorno y coeficientes de rugosidad.
  - **Manual para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales** del CENEPRED, para la clasificación del nivel de peligro por inundación.
- **Equipos de campo:**
  - **Receptor GPS de mano**, para la georreferenciación de los puntos de verificación (P01–P46) de las zonas de peligro y los elementos expuestos.

  - **Cámara fotográfica**, para el registro visual de las zonas críticas y de las estructuras existentes en el cauce.
- **Software de procesamiento y modelación:**
  - **ArcGIS Pro 3.5.4**, para la delimitación de la cuenca, el análisis morfométrico y la cartografía.
  - **QGIS 3.44**, para el mapeo de las zonas de inundación y peligro y el post-procesamiento de los resultados.
  - **HidroEsta 2**, para el análisis estadístico de las precipitaciones máximas.
  - **HEC-HMS 4.13**, para la modelación hidrológica y la estimación de los caudales de diseño.
  - **Blue Kenue 3.3**, para la construcción de la malla de elementos finitos y las condiciones de contorno.
  - **openTELEMAC-MASCARET v9.1.1** (módulo TELEMAC-2D, compilado en modo serial), para la simulación hidrodinámica bidimensional.
  - **Python 3.11**, para la automatización del procesamiento de datos y la generación de gráficos.
- **Herramientas de gestión bibliográfica y redacción:**
  - **Zotero**, gestor de referencias empleado para organizar los antecedentes internacionales y nacionales, con exportación en formato BibTeX compatible con `biblatex-apa`.
  - **LaTeX** (distribución TeX Live) con el paquete `biblatex-apa`, para la redacción del documento conforme a la norma APA 7.ª edición y al formato de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

3.11.3. Herramientas de software utilizadas

En la presente investigación se emplearon las herramientas de software detalladas en el Cuadro 8.

Cuadro 8: Herramientas de software utilizadas en el desarrollo del análisis morfométrico y la modelación hidrológica e hidráulica del río Pongora

Herramienta	Descripción
LaTeX	Preparación y edición del informe final de investigación con tipografía científica conforme al formato de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la UNSCH y a la norma APA 7.ª edición.

Continúa en la siguiente hoja

Cuadro 8: Herramientas de software utilizadas en el desarrollo del análisis morfométrico y la modelación hidrológica e hidráulica del río Pongora (Continued)

Herramienta	Descripción
ArcGIS Pro 3.5.4	Delimitación de la cuenca del río Pongora, análisis morfométrico (parámetros de forma, relieve y red de drenaje según Strahler) y elaboración de la cartografía temática.
QGIS 3.44	Post-procesamiento de los resultados de TELEMAC-2D, mapeo de las zonas de inundación y de peligro por periodo de retorno, y gestión de los puntos de verificación de campo (P01–P46).
HidroEsta 2	Análisis estadístico de las precipitaciones máximas en 24 horas, ajuste mediante la distribución Log-Pearson tipo III y prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov.
HEC-HMS 4.13	Modelación hidrológica lluvia-escorrentía por el método del número de curva (SCS) y estimación de los caudales máximos de diseño para los periodos de retorno de 25, 50, 100, 140, 200 y 500 años.
Blue Kenue 3.3	Construcción de la malla no estructurada de elementos finitos del tramo de estudio y definición de las condiciones de contorno del modelo hidrodinámico.
openTELEMAC-MASCARET v9.1.1	Simulación hidráulica bidimensional mediante el módulo TELEMAC-2D, que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant por el método de los elementos finitos; compilado en modo serial.
Python 3.11	Automatización del procesamiento de datos (descarga y recorte de los DEM, conversión de formatos) y generación de gráficos de apoyo.
Zotero	Gestión de las referencias bibliográficas de los antecedentes internacionales y nacionales, con exportación en formato BibTeX compatible con `biblatex-apa`.

Fuente: Elaboración propia

3.12. Desarrollo del trabajo de tesis

3.12.1. Recopilación de la información base

El desarrollo de la investigación se inició con la recopilación de la información base necesaria para caracterizar la cuenca del río Pongora y modelar su comportamiento hidráulico. Esta información comprende los modelos digitales de elevación, los registros pluviométricos, las capas vectoriales de referencia y el estudio hidrológico oficial de la zona. A continuación se describe cada fuente y su tratamiento inicial.

3.12.1.1 Modelos digitales de elevación

Se emplearon dos modelos digitales de elevación (DEM) con propósitos distintos, según el nivel de detalle requerido en cada etapa. Para la delimitación de la cuenca completa se utilizó un modelo SRTM de 30 m de resolución , este modelo se reproyectó al sistema UTM WGS84 zona 18 S con una resolución de 30 m para su uso en el análisis hidrológico y morfométrico.

Para la construcción de la malla de elementos finitos del tramo de estudio se utilizó un modelo ALOS PALSAR, descargado del repositorio de la Alaska Satellite Facility. Este modelo, de mayor detalle, se reproyectó a EPSG:32718 y se recortó a un dominio centrado en el punto de aforo, obteniéndose el archivo final de 12.5 m de resolución empleado para asignar las cotas de fondo a los nodos de la malla. La mayor resolución del ALOS PALSAR se reservó para el tramo del puente, que es donde se concentra el interés de la modelación hidráulica.

3.12.1.2 Registros pluviométricos

La información pluviométrica corresponde a la precipitación máxima en 24 horas (serie de máximos anuales) de seis estaciones del SENAMHI ubicadas en el ámbito de la cuenca y su entorno. Estos registros, atribuidos por el estudio de referencia a la fuente SENAMHI, quedaron compilados en la sección Anexos del estudio hidrológico de la DRTCA (2022), de donde se recuperaron para la presente investigación; su gestión en el ámbito regional corresponde a la OPEMAN del Gobierno Regional de Ayacucho. El Cuadro 9 detalla las estaciones empleadas.

Cuadro 9

Estaciones del SENAMHI empleadas y su número de registros de precipitación máxima en 24 horas

Estación	Coordenadas	Altitud (m s.n.m.)	Distrito / Prov.	Periodo	N.° datos
Quinua	13°03'00"S; 74°08'00.0	3215	Quinua / Huamanga	1988–2018	30
Tambillo	13°13'06.7"S; 74°06'22.7.0	3343	Tambillo / Huamanga	1992–2018	27
Pucaloma	13°12'21.5"S; 74°17'57.5.0	3493	Socos / Huamanga	1995–2018	22
Chiara	13°17'25.6"S; 74°12'39.5.0	3587	Chiara / Huamanga	1993–2018	26
Chontaca	13°17'44.3"S; 74°01'33.5.0	3497	Acocro / Huamanga	1992–2018	27
Cuchoquesera	13°25'50.2"S; 74°20'32.4.0	3724	Chuschi / Cangallo	1992–2018	27
Total					**159**

Nota. Precipitación máxima en 24 horas. Fuente: Estaciones del SENAMHI (información provista por la OPEMAN del Gobierno Regional de Ayacucho), compiladas en la sección Anexos

Respecto al control de calidad de las series, el estudio de referencia aplicó el método del Water Resources Council para la detección de datos dudosos y no identificó valores atípicos (altos ni bajos) en ninguna estación. En el tratamiento de los años sin dato existe una diferencia metodológica que se declara explícitamente: Mientras el estudio oficial computa los años totalmente sin registro como 0 mm en sus promedios, en el presente análisis dichos años se excluyeron de la serie; por esta razón las estaciones de Quinua y Pucaloma presentan un número de datos ligeramente distinto al del conteo oficial. Adicionalmente, el propio estudio de referencia presenta discrepancias internas entre el cuerpo del informe y sus Anexos en el periodo de registro de Quinua, en algunas coordenadas y en el conteo de datos válidos de ciertas estaciones, las cuales se resolvieron adoptando de manera consistente los valores del Anexos, que es la fuente de la serie efectivamente empleada.

3.12.1.3 Capas vectoriales de referencia

Se incorporaron capas vectoriales oficiales, descargadas de entidades del Estado y redistribuidas a través de la plataforma GeoGPSPerú, con fines de verificación y de elaboración de los mapas de contexto. El Cuadro 10 las resume.

Cuadro 10
Capas vectoriales empleadas como referencia y contexto

Capa	Fuente	Aplicación
Ríos y quebradas (ANA)	ANA (vía GeoGPSPerú)	Verificación de la red de drenaje y mapas de contexto
Red hídrica lineal (IGN/IDEP)	IGN/IDEP (vía GeoGPSPerú)	Verificación de la red hídrica oficial
Límites provinciales 2023	INEI (vía GeoGPSPerú)	Mapas de contexto administrativo
Límites distritales 2025 (CPV)	INEI (Censo CPV)	Mapas de contexto administrativo
Cobertura vegetal 2015	MINAM	Referencia de cobertura (no aplicada en los cálculos)
Puntos de verificación de campo	Generación propia	Verificación de campo (49 puntos; 23 prioritarios; 24 fotos georreferenciadas)

Nota. Elaboración propia. Las capas de red hídrica se emplearon para contrastar la red extraída del DEM; la delimitación se realizó únicamente con el modelo digital de elevación.

3.12.1.4 Estudio hidrológico de referencia (DRTCA, 2022)

El estudio hidrológico e hidráulico de la DRTCA (2022) para el puente proyectado sobre el río Pongora cumplió un triple rol en la investigación. En primer lugar, fue la fuente de la información base recuperada: La serie pluviométrica de sus anexos, los parámetros hidrológicos por subcuenca (número de curva, tiempo de concentración y tiempo de retardo) de su Cuadro 8, el punto de aforo y el coeficiente de rugosidad de referencia. En segundo lugar, sirvió como patrón de verificación de la morfometría, al contrastar el área, el perímetro, los coeficientes de forma, la longitud del cauce y el orden de la red obtenidos de manera independiente. En tercer lugar, funcionó como patrón de validación de los caudales, al comparar los dos únicos valores oficiales disponibles (Q_{140} y Q_{500}) contra la reconstrucción hidrológica propia. Cabe subrayar que dicho estudio no desarrolló una modelación bidimensional por elementos finitos del tramo, que constituye el aporte original de la presente investigación y que sirvio como una comparación para ver como la metodológia de elementos finitos es viable.

3.12.1.5 Punto de aforo

El punto de aforo se ubicó en el eje del puente proyectado sobre el río Pongora, en las coordenadas 583 827.00 m E y 8 553 291.00 m N (UTM WGS84 zona 18 S), a una cota de 2 459.99 m s.n.m., según el emplazamiento definido en el estudio de la DRTCA (2022). Este mismo punto se empleó de manera consistente en los tres usos del flujo de trabajo: Como punto de descarga (*snap pour point*) en la delimitación de la cuenca, como centro del recorte del DEM ALOS PALSAR y como centro del dominio de la malla de elementos finitos.

La Figura 11 muestra su ubicación.

Figura 11
Ubicación del punto de aforo del río Pongora



Nota. Elaboración propia sobre imagen satelital. Punto de aforo en el eje del puente proyectado sobre el río Pongora, junto a la carretera Huanta–Ayacucho.

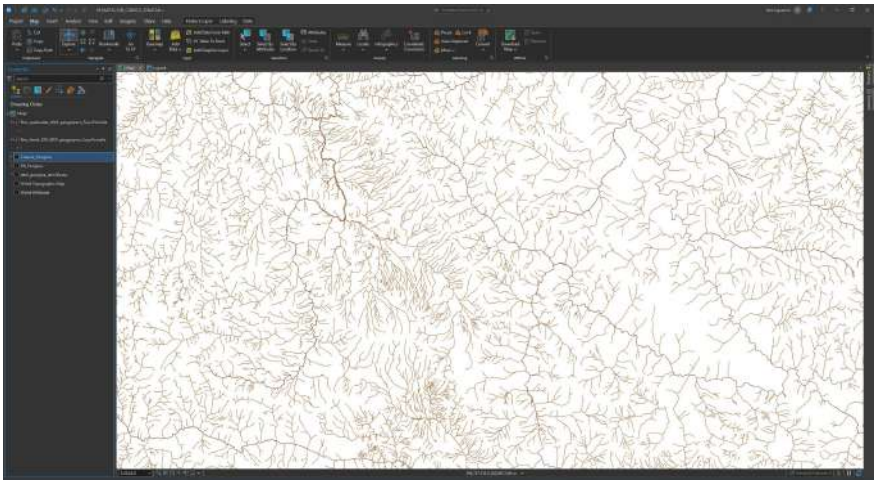
3.12.2. Delimitación de la cuenca

3.12.2.1 Secuencia de delimitación.

La delimitación de la cuenca del río Pongora se ejecutó en ArcGIS Pro, aplicado sobre el modelo digital de elevación SRTM de 30 m. El procedimiento siguió la secuencia hidrológica estándar del análisis de terreno, cuyos pasos se describen y se ilustran a continuación.

Como paso previo, se cargaron en el proyecto las capas base de referencia: La red hídrica oficial de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y del Instituto Geográfico Nacional (IGN), que sirvieron para orientar la ubicación del punto de aforo y para verificar la coherencia del trazado obtenido. La Figura 12 muestra la disposición de estas capas sobre el ámbito de la cuenca.

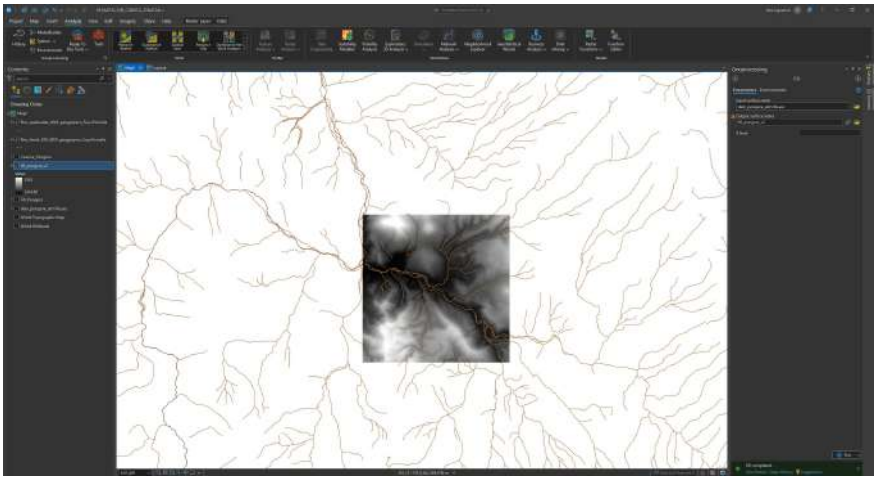
Figura 12
Capas base y red hídrica oficial de referencia (ANA e IGN)



Nota. Elaboración propia en ArcGIS Pro.

A continuación se corrigió el modelo digital de elevación con la herramienta *Fill*, que rellena las depresiones o celdas sin salida del terreno para garantizar un flujo continuo en toda la superficie. Este preprocesamiento es indispensable, pues las imperfecciones del DEM interrumpen el escurrimiento y generan una red de drenaje discontinua. El resultado se aprecia en la Figura 13.

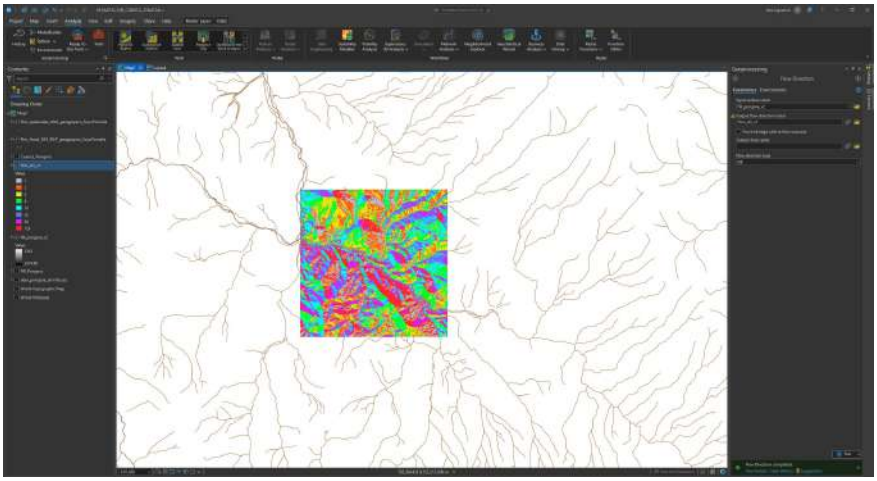
Figura 13
Corrección del modelo digital de elevación mediante Fill



Nota. Elaboración propia en ArcGIS Pro. Relleno de depresiones del terreno sobre el DEM.

Sobre el DEM corregido se calculó la dirección de flujo con la herramienta *Flow Direction*, que asigna a cada celda la dirección de máxima pendiente hacia una de sus ocho celdas vecinas, según el método de las ocho direcciones (D8). La Figura 14 presenta el ráster resultante, en el que cada color codifica una de las ocho direcciones de escurrimiento.

Figura 14
Dirección de flujo (Flow Direction, método D8)

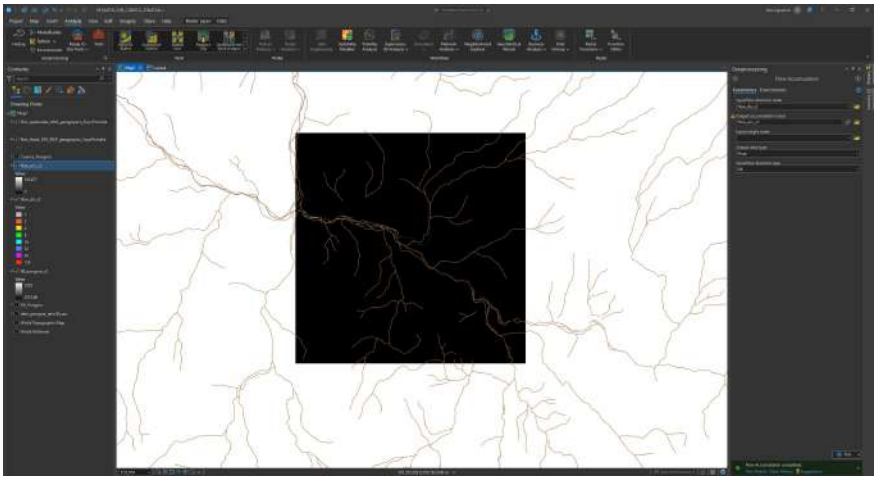


Nota. Elaboración propia en ArcGIS Pro.

Con la dirección de flujo ya definida se obtuvo la acumulación de flujo mediante *Flow Accumulation*, herramienta que cuantifica, para cada celda, el número de celdas que drenan

hacia ella. Las celdas con mayor acumulación conforman los cauces principales y permiten visualizar la red de drenaje derivada del DEM, tal como se observa en la Figura 15.

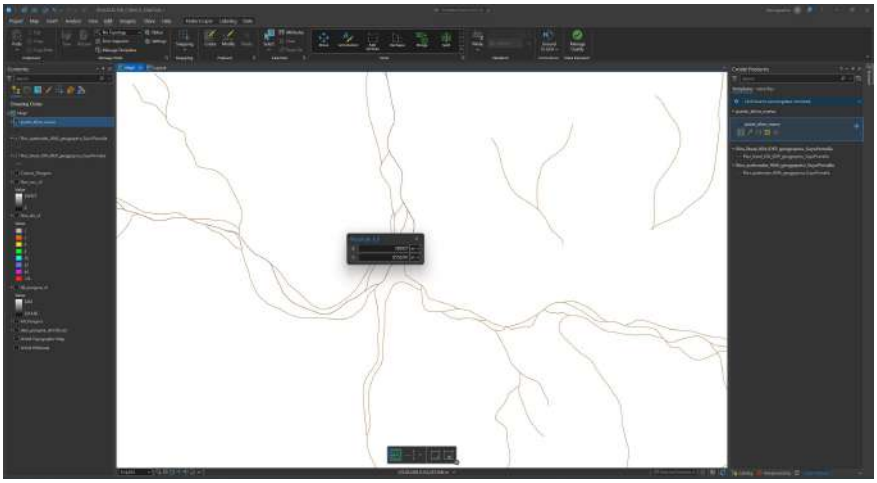
Figura 15
Acumulación de flujo (Flow Accumulation)



Nota. Elaboración propia en ArcGIS Pro.

Definida la red, se estableció el punto de aforo en las coordenadas 583 827 m E y 8 553 291 m N (EPSG:32718), sobre el eje del puente proyectado, y se ajustó a la celda de mayor acumulación con la herramienta *Snap Pour Point*, empleando un radio de ajuste de 500 m. Este ajuste evita que un error de posición del punto derive en una cuenca truncada. La Figura 16 muestra la ubicación del punto de aforo sobre la red de drenaje.

Figura 16
Definición del punto de aforo (583 827 E; 8 553 291 N)

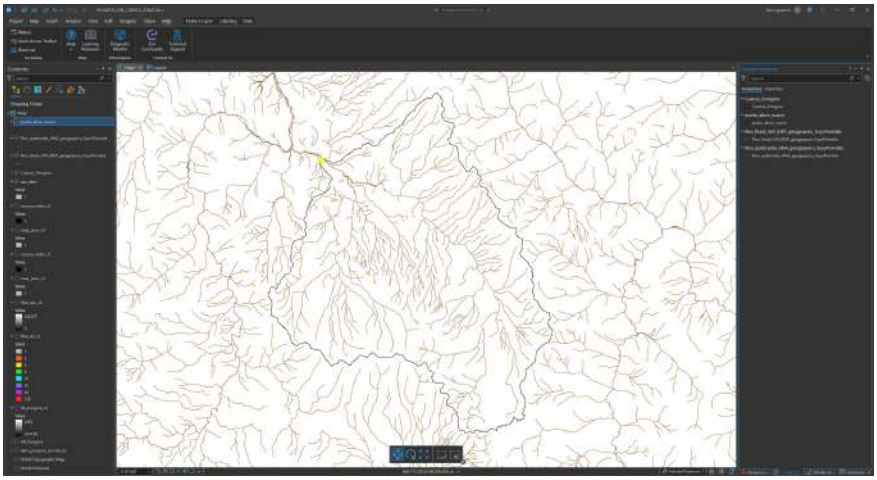


Nota. Elaboración propia en ArcGIS Pro. Punto de aforo en el eje del puente proyectado.

Finalmente, a partir del punto de aforo ajustado se delimitó la cuenca con la herramienta *Watershed*, que identifica todas las celdas que drenan hacia dicho punto, y se jerarquizó la red de drenaje según la clasificación de Strahler a partir de las celdas con acumulación mayor a 200 (umbral equivalente a un área de aporte mínima de 0.18 km^2). La Figura 17

presenta la cuenca del río Pongora ya delimitada.

Figura 17
Cuenca del río Pongora delimitada



Nota. Elaboración propia en ArcGIS Pro. El punto amarillo indica el aforo.

3.12.2.2 Área obtenida y verificación del borde.

La cuenca delimitada abarcó un área de 1 129.77 km^2, prácticamente coincidente con la del estudio oficial de la DRTCA (1 127.68 km^2), con una diferencia de apenas 0.19 %. El script incorpora una verificación automática que comprueba que la cuenca no toque el borde del DEM (con una tolerancia de 200 m en los cuatro lados), la cual se cumplió satisfactoriamente; este control es relevante porque un intento previo de delimitación con el DEM ALOS recortado de 10×10 km arrojaba un área de solo 697 km^2 al quedar la cuenca truncada, razón por la cual la delimitación se realizó con el SRTM de 30 m, que cubre la totalidad de la cuenca.

3.12.2.3 Verificación de la red de drenaje.

La red de drenaje extraída del DEM se contrastó de manera visual con la cartografía oficial de ríos y quebradas de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y del Instituto Geográfico Nacional (IGN), superpuestas como capas de referencia en el proyecto de ArcGIS Pro. Esta verificación cualitativa confirmó la coherencia del trazado de la red derivada respecto a la red hídrica oficial.

3.12.3. Parámetros morfométricos

A partir de la cuenca delimitada se calcularon los parámetros morfométricos de forma, relieve y red de drenaje, cuyos resultados se contrastaron con los del estudio oficial de la DRTCA (2022) como patrón de verificación. El Cuadro 11 presenta la comparación.

Cuadro 11
Parámetros morfométricos de la cuenca del río Pongora: Cálculo propio frente al estudio oficial DRTCA (2022)

Parámetro	Propio	Oficial DRTCA	Dif.
Área	1 129.77 km^2	1 127.68 km^2	+0.19 %
Perímetro	230.58 km	231.60 km	−0.44 %
Longitud del cauce principal	70.58 km	68.69 km	+2.75 %
Coef. de compacidad K_c (Gravelius)	1.921	1.94	−0.98 %
Factor de forma K_f (Horton)	0.227	0.24	−5.42 %
Radio de circularidad (Miller)	0.267	0.26	+2.69 %
Ancho medio	16.01 km	16.42 km	−2.50 %
Altitud media	3 520.2 msnm	3 522.7 msnm	−0.07 %
Altitud máxima	4 428.9 msnm	4 436 msnm	−0.16 %
Altitud mínima	2 435.6 msnm	2 443 msnm	−0.30 %
Pendiente media de la cuenca	29.31 %	1.90 %	fórmulas distintas
Pendiente del cauce principal	0.0282 m/m	0.03 m/m	−6.0 %
Orden de la red (Strahler)	6	6	igual
Densidad de drenaje	—	1.64 km/km^2	adoptado
Tiempo de concentración (Témez)	15.01 h	14.63 h	+2.60 %

Nota. Elaboración propia. Fórmulas: $K_c = 0{,}28\,P/\sqrt{A}$; $K_f = A/L^2$; $R_e = 4\pi A/P^2$; $T_c = 0{,}3\,(L/J^{0{,}25})^{0{,}76}$.

La mayoría de los parámetros presenta una coincidencia muy alta con el estudio oficial, con diferencias inferiores al 3 %, lo que valida la delimitación y el cálculo morfométrico propios. Dos parámetros requieren una aclaración metodológica. En primer lugar, la **pendiente media de la cuenca** difiere notablemente (29.31 % frente a 1.90 %) porque se calculó como el promedio aritmético del ráster de pendiente, mientras que el estudio oficial emplea el método del rectángulo equivalente (Alvord), recomendado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones; se trata, por tanto, de dos definiciones distintas y no de un error. En segundo lugar, para la **densidad de drenaje** se adopta el valor oficial de 1.64 km/km^2: La red extraída de manera automática con el umbral de acumulación empleado sobrestima la ramificación de bajo orden alcanzando un orden de 8 frente al orden 6 de la cuenca, por lo que el valor propio no se reporta y el umbral no se recalibró por estar fuera del alcance de los objetivos.

Los productos cartográficos derivados de esta etapa se presentan en el Anexo (Planos N-03 a N-05).

3.12.4. Análisis hidrológico

El análisis hidrológico transformó los registros de precipitación de las estaciones del SENAMHI en las precipitaciones e intensidades de diseño que alimentaron la modelación hidrológica. Todo el procesamiento se ejecutó con rutinas propias en Python; el estudio oficial de la DRTCA (2022) se empleó únicamente como patrón de verificación. El análisis abarcó cuatro etapas: El análisis de frecuencia de la precipitación máxima en 24 horas, la estimación de la precipitación areal por polígonos de Thiessen, la construcción de las curvas intensidad–duración–frecuencia y la generación de los hietogramas de diseño, para los periodos de retorno de 25, 50, 100, 140, 200 y 500 años.

3.12.4.1 Análisis de frecuencia de la precipitación máxima en 24 horas.

Las series históricas de precipitación máxima en 24 horas de las seis estaciones se ajustaron a la distribución Log-Pearson tipo III mediante el método de los momentos sobre los logaritmos decimales de los datos, con el script `analisis_hidrologico_pongora.py`. Se adoptó un criterio uniforme la misma distribución en las seis estaciones para garantizar la consistencia del análisis. La bondad del ajuste se verificó con la prueba de Kolmogorov-Smirnov con un nivel de significancia de 0.05; en las seis estaciones el estadístico calculado resultó menor que el valor crítico, por lo que el ajuste se aceptó en todos los casos (Cuadro 12).

Cuadro 12
Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov de la distribución Log-Pearson tipo III

Estación	n	Δ calc.	Δ crít.	p-valor	Resultado
Quinua	30	0.1125	0.2483	0.8016	Se acepta
Tambillo	27	0.1579	0.2617	0.4644	Se acepta
Pucaloma	22	0.1239	0.2900	0.8475	Se acepta
Chiara	26	0.1481	0.2667	0.5678	Se acepta
Chontaca	27	0.0795	0.2617	0.9904	Se acepta
Cuchoquesera	27	0.1465	0.2617	0.5592	Se acepta

Nota. Elaboración propia. n: Número de años de registro; Δ: Estadístico de Kolmogorov-Smirnov.

A partir de los ajustes se calcularon las precipitaciones de diseño para cada periodo de retorno, a las que se aplicó el factor de corrección de la Organización Meteorológica Mundial de 1.13 sobre los cuantiles obtenidos, para corregir el sesgo de la observación en un intervalo fijo diario. El Cuadro 13 presenta las precipitaciones máximas en 24 horas de diseño ya corregidas.

Cuadro 13

Precipitaciones máximas en 24 horas de diseño por estación (mm, corregidas con el factor OMM 1.13)

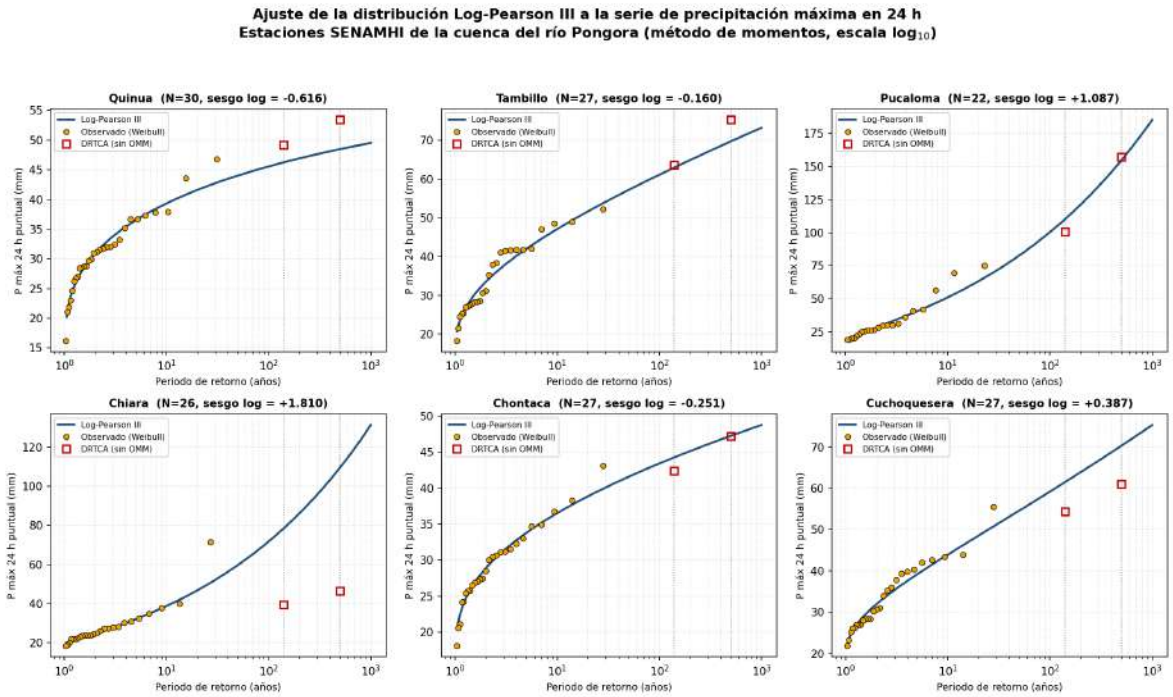
Estación	Tr 25	Tr 50	Tr 100	Tr 140	Tr 200	Tr 500
Quinua	47.72	49.74	51.49	52.25	53.02	54.77
Tambillo	59.90	64.57	69.01	71.10	73.27	78.70
Pucaloma	76.44	93.44	113.46	124.43	137.06	174.87
Chiara	56.10	67.47	81.05	88.57	97.29	123.72
Chontaca	44.68	46.96	49.04	50.00	50.98	53.37
Cuchoquesera	56.53	61.70	66.92	69.49	72.24	79.48

Nota. Elaboración propia. Valores en milímetros. Tr: Periodo de retorno en años.

El ajuste de la distribución a las series observadas se muestra en la Figura 18, donde se contrasta la curva teórica con los datos observados —graficados según la posición de Weibull— y con los valores del estudio oficial de la DRTCA.

Figura 18

Ajuste de la distribución Log-Pearson tipo III en las seis estaciones



Nota. Elaboración propia. La curva azul representa el ajuste Log-Pearson tipo III; los puntos, la precipitación observada; los cuadros, los valores del estudio oficial DRTCA.

El método propio reprodujo con fidelidad al estudio oficial: En cinco de las seis estaciones la precipitación de diseño para 500 años se mantuvo dentro de ±15 % respecto de la del DRTCA, y en la estación Chontaca la coincidencia fue exacta. La única discrepancia relevante se presentó en la estación Chiara, cuyo valor para 500 años obtenido con la serie completa (123.72 mm) superó ampliamente al oficial (52.56 mm).

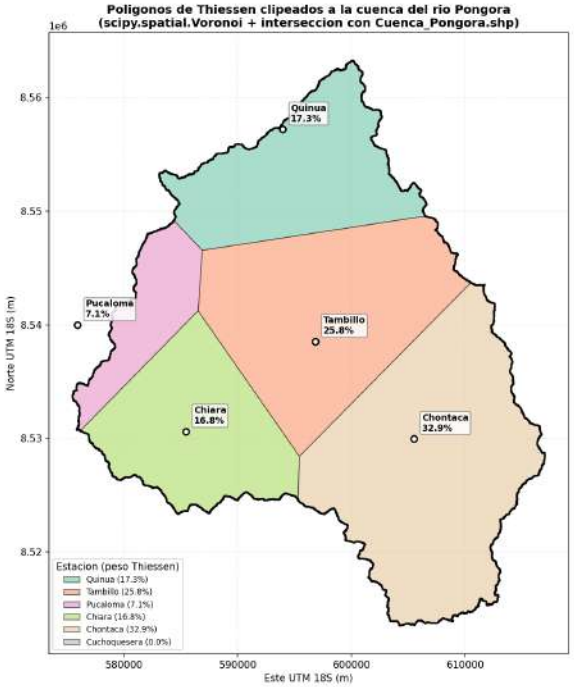
El análisis identificó la causa en un único dato: El máximo registrado en 2014 alcanzó 71.50 mm, un valor 79 % superior al segundo máximo de la serie (40.00 mm). La prueba de Grubbs aplicada sobre los logaritmos confirmó su carácter atípico ($G = 3{,}49 > G_{\text{crít}} = 2{,}84$; $\alpha = 0{,}05$), y su efecto elevó el coeficiente de sesgo logarítmico de la estación a $+1{,}81$, el más alto de las seis, lo que empinó la cola superior de la distribución. Un análisis de sensibilidad confirmó el diagnóstico: Al excluir el registro de 2014, el sesgo logarítmico desciende a $+0{,}54$ y la precipitación para 500 años se reduce a 59.27 mm, prácticamente igual al valor oficial.

Por esta razón, y para no sobrestimar los caudales de crecida, en la modelación hidrológica posterior se adoptó para la estación Chiara la serie depurada, sin el dato atípico de 2014, mientras que el análisis de frecuencia conserva el valor de la serie completa a título documental. El efecto de esta corrección sobre el resultado final queda, en todo caso, acotado por el bajo peso de Chiara en la ponderación areal (16.83 %).

3.12.4.2 Precipitación areal por polígonos de Thiessen.

La precipitación puntual de las estaciones se espacializó sobre la cuenca mediante el método de los polígonos de Thiessen, ; a cada estación se le asignó como peso la fracción del área de la cuenca contenida en su polígono. La robustez del cálculo se comprobó recalculando los pesos, con resultados idénticos. La Figura 19 presenta la distribución espacial de los polígonos.

Figura 19
Polígonos de Thiessen recortados a la cuenca del río Pongora



Nota. Elaboración propia en Python.

El Cuadro 14 presenta los pesos resultantes. La estación Chontaca, la de mayor área de influencia, concentró el 32.95 % del peso, seguida de Tambillo con el 25.81 %. La estación Cuchoquesera resultó con un peso de 0.00 %, pues su polígono quedó íntegramente fuera del contorno de la cuenca; en consecuencia, no aportó a la precipitación areal, aunque se mantuvo en el análisis de frecuencia por su cercanía al ámbito de estudio.

Cuadro 14
Pesos de Thiessen y precipitación areal de diseño de la cuenca del río Pongora

Estación	Peso de Thiessen
Chontaca	32.95 %
Tambillo	25.81 %
Quinua	17.27 %
Chiara	16.83 %
Pucaloma	7.14 %
Cuchoquesera	0.00 %

Nota. Elaboración propia. La suma de los pesos es 100.00 %.

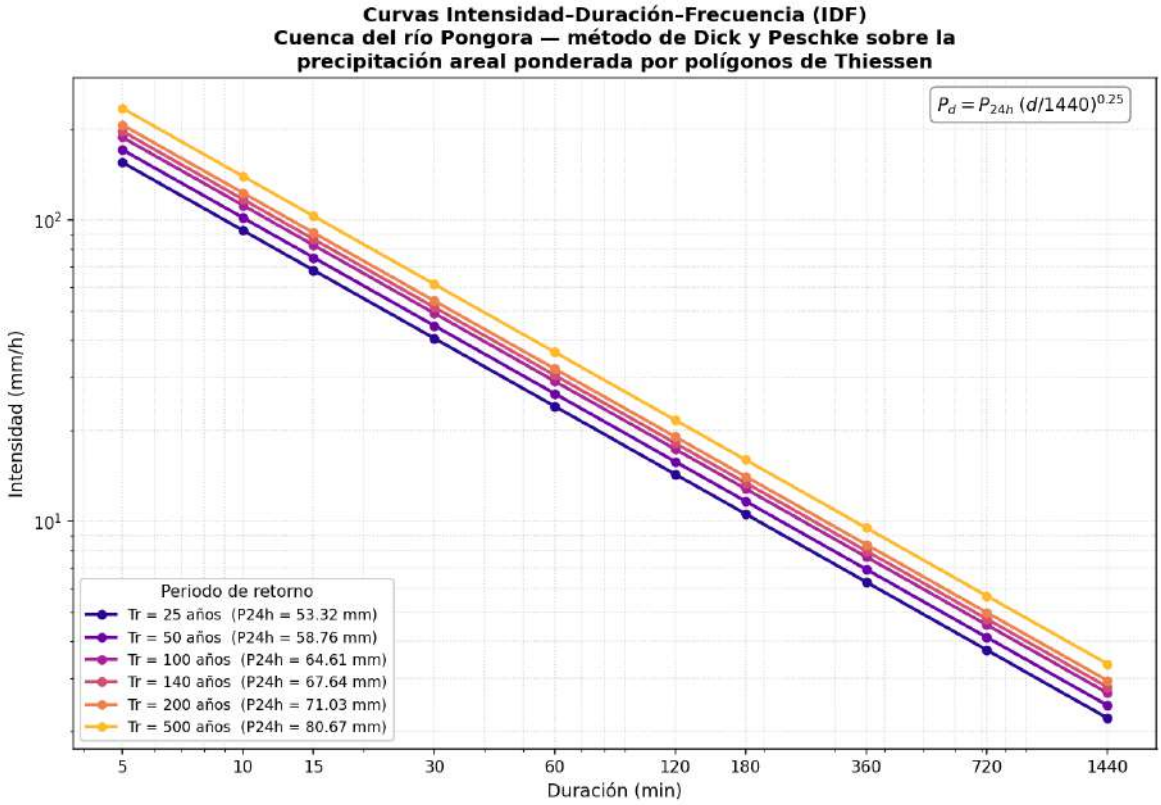
Con estos pesos se obtuvo la precipitación areal ponderada de la cuenca para cada periodo de retorno: 53.32 mm para 25 años, 58.76 mm para 50 años, 64.61 mm para 100 años, 67.64 mm para 140 años, 71.03 mm para 200 años y 80.67 mm para 500 años. Estos valores constituyeron la entrada de lluvia de la modelación hidrológica.

3.12.4.3 Curvas intensidad–duración–frecuencia.

A partir de la precipitación areal se construyeron las curvas intensidad–duración–frecuencia mediante el modelo de Dick y Peschke, que estima la precipitación de una duración d a partir de la precipitación en 24 horas según la expresión $P_d = P_{24\text{h}}\,(d/1440)^{0{,}25}$, con d en minutos. Las curvas se calcularon para diez duraciones comprendidas entre 5 y 1440 minutos y para los seis periodos de retorno (Figura 20).

Figura 20

Curvas intensidad–duración–frecuencia (método de Dick y Peschke)



Nota. Elaboración propia. Curvas construidas sobre la precipitación areal ponderada por polígonos de Thiessen.

Para una duración de referencia de 60 minutos, la intensidad areal varió entre 24.09 mm/h para el periodo de retorno de 25 años y 36.44 mm/h para el de 500 años. El Cuadro 15 presenta las intensidades a 60 minutos por estación, que evidencian la mayor agresividad pluviométrica de las estaciones Pucaloma y Chiara, situadas en el sector de mayor sesgo de las series.

Cuadro 15
Intensidades de diseño a 60 minutos por estación (mm/h), método de Dick y Peschke

Estación	Tr 25	Tr 50	Tr 100	Tr 140	Tr 200	Tr 500
Quinua	21.56	22.47	23.26	23.61	23.95	24.75
Tambillo	27.06	29.17	31.18	32.12	33.10	35.56
Pucaloma	34.54	42.22	51.26	56.22	61.92	79.01
Chiara	25.35	30.48	36.62	40.02	43.96	55.90
Chontaca	20.19	21.22	22.16	22.59	23.03	24.11
Cuchoquesera	25.54	27.88	30.23	31.40	32.64	35.91

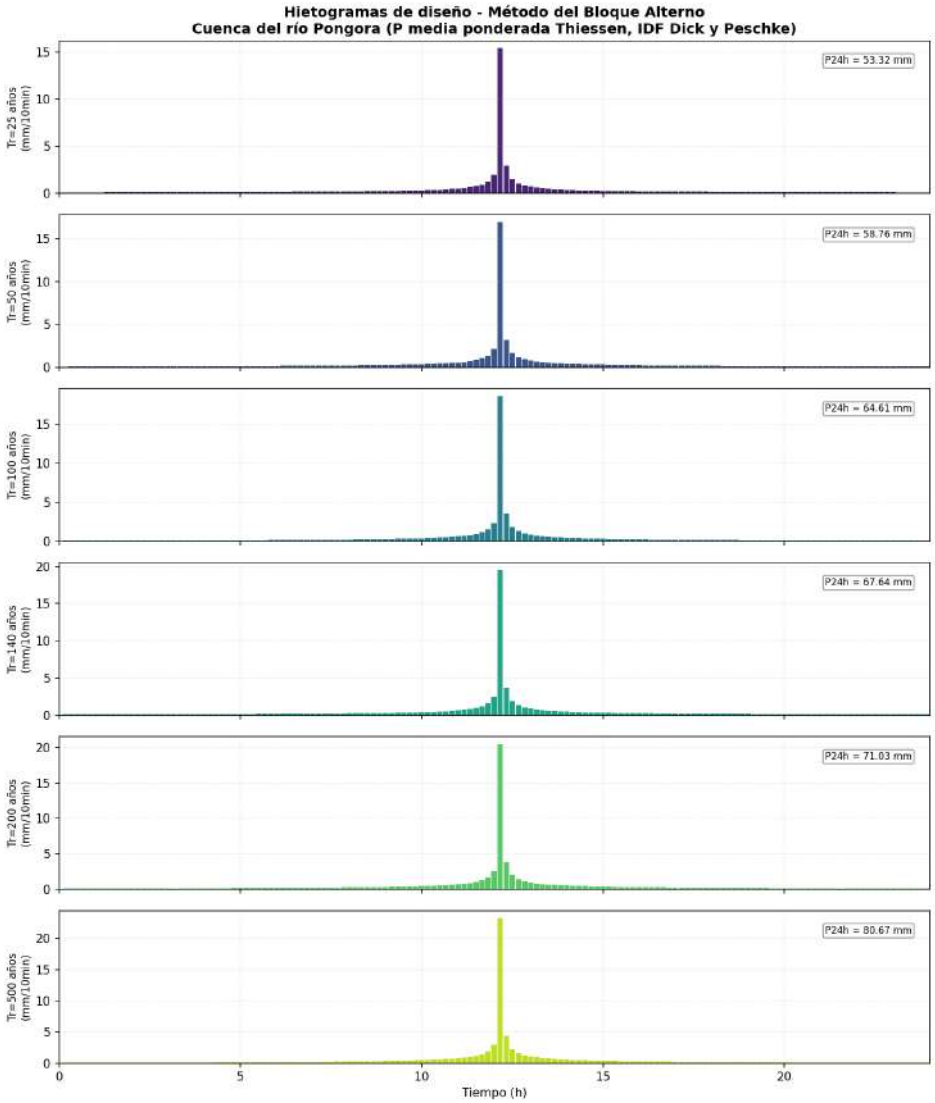
Nota. Elaboración propia. Valores en mm/h para una duración de 60 minutos.

3.12.4.4 Hietogramas de diseño.

Finalmente, se generaron los hietogramas de diseño con el método del bloque alterno, aplicado sobre las curvas intensidad–duración–frecuencia de la precipitación areal, con el script `preparar_hec_hms_pongora.py`. Se adoptó una tormenta de diseño de 24 horas de duración discretizada en intervalos de 10 minutos, lo que generó 144 bloques de precipitación por cada periodo de retorno. El método ordena las intensidades de mayor a menor y las distribuye de forma alternada en torno al bloque central, con lo que se obtiene una tormenta de diseño con el pico de intensidad concentrado en la parte media del evento (Figura 21). Estos hietogramas constituyeron la entrada de precipitación del modelo hidrológico HEC-HMS.

Figura 21

Hietogramas de diseño por periodo de retorno (método del bloque alterno)



Nota. Elaboración propia. Hietogramas construidos sobre la precipitación areal ponderada por polígonos de Thiessen y las curvas IDF de Dick y Peschke.

3.12.5. Modelación hidrológica

La transformación de la precipitación de diseño en caudales de crecida se realizó con el programa HEC-HMS versión 4.13. Se construyeron dos modelos de complejidad creciente: Un modelo agregado preliminar, de una sola unidad, que sirvió para operar el programa y obtener una primera estimación, y el modelo distribuido definitivo, de 26 subcuencas con tránsito hidráulico en cauces, del cual se obtuvieron los caudales que alimentaron la modelación bidimensional.

3.12.5.1 Modelo agregado preliminar.

El primer modelo representó la cuenca como una única subcuenca (`SC_Pongora`) conectada a un punto de descarga (Figura 22). Se adoptaron el método de pérdidas inicial y constante, la transformación de hidrograma unitario de Clark y un flujo base de recesión,

con un intervalo de cálculo de 10 minutos. Como tiempo de concentración se adoptó 10.98 horas, promedio de los valores obtenidos por las ecuaciones de Kirpich (6.95 h) y de Témez (15.02 h), del que resultó un tiempo de retardo del Soil Conservation Service de 395.4 minutos. Los hietogramas de diseño se ingresaron para cada periodo de retorno mediante estaciones de precipitación de tipo hietograma especificado (Figura 23), y cada corrida generó el hidrograma de salida correspondiente (Figura 24).

Figura 22

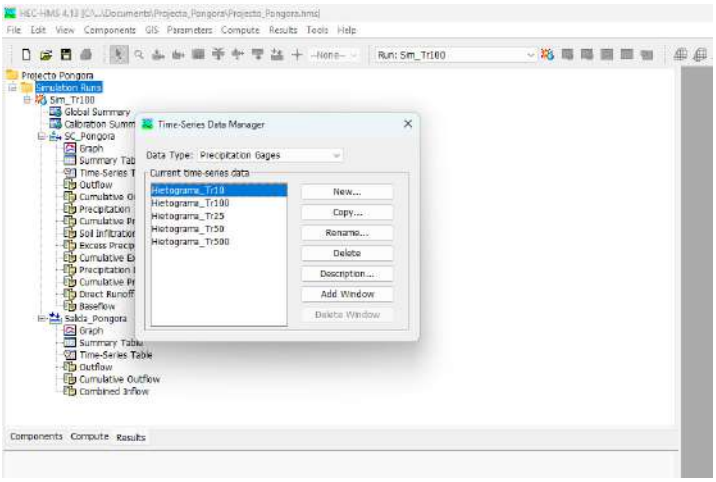
Creación del proyecto en HEC-HMS 4.13



Nota. Elaboración propia en HEC-HMS 4.13.

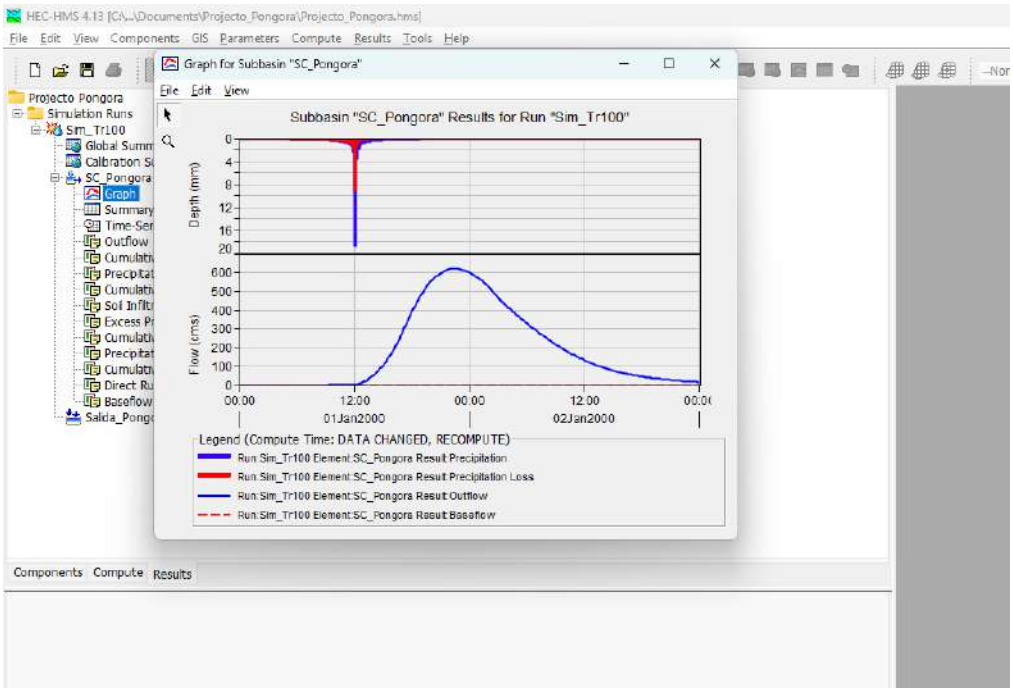
Figura 23

Hietogramas de diseño ingresados por periodo de retorno



Nota. Elaboración propia en HEC-HMS 4.13. Estaciones de precipitación de los seis periodos de retorno.

Figura 24
Hidrograma de salida del modelo(corrida de 100 años)



Nota. Elaboración propia en HEC-HMS 4.13.

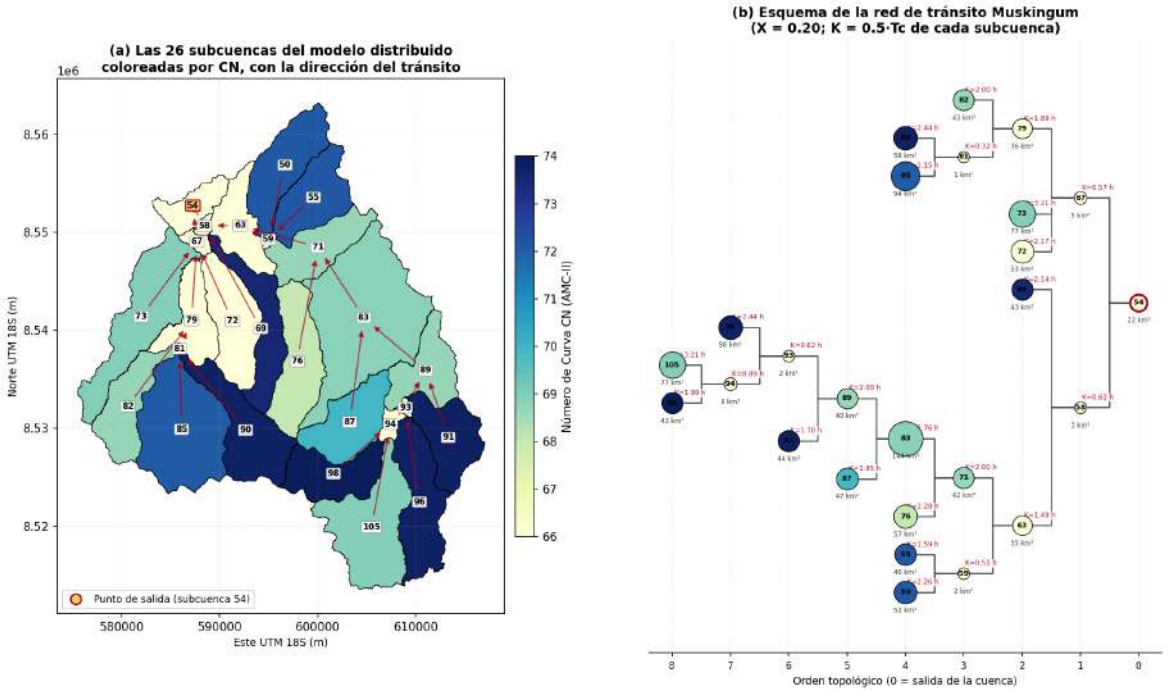
Este modelo agregado, al concentrar el escurrimiento de toda la cuenca en una sola unidad sin tránsito en cauces, sobrestima el caudal pico y no reproduce el amortiguamiento de la onda de crecida a lo largo de la red hídrica. Por ello se empleó únicamente como aproximación preliminar y como verificación del flujo de trabajo, y no como fuente de los caudales de diseño.

3.12.5.2 Modelo distribuido definitivo.

El modelo definitivo discretizó la cuenca en las 26 subcuencas delimitadas y conectó sus hidrogramas a lo largo de la red de drenaje, con un único punto de descarga en la subcuenca de salida (Figura 25). La estructura de la red alcanzó una profundidad máxima de ocho niveles de confluencia, sobre un área total de 1 129.63 km^2.

Figura 25

Esquema del modelo distribuido: 26 subcuencas y tránsitos de Muskingum



Nota. Elaboración propia. Panel izquierdo: Subcuencas coloreadas por número de curva y sentido del tránsito; panel derecho: Árbol de confluencias con el parámetro $K = 0{,}5\,T_c$ de cada tramo.

Las pérdidas por infiltración se estimaron con el método del número de curva del Soil Conservation Service, que calcula la precipitación efectiva $P_e = (P - I_a)^2/(P - I_a + S)$, con la abstracción inicial $I_a = 0{,}2\,S$ y la retención potencial $S = 25\,400/CN - 254$ en milímetros. El número de curva se asignó a cada subcuenca a partir del Cuadro 8 del estudio de la DRTCA , con valores comprendidos entre 66.00 y 73.94 (Cuadro 16). El número de curva ponderado por área resultó de 70.05, prácticamente igual al valor oficial de 70.62 (diferencia de $-0{,}8$ %), del que se obtuvo una retención potencial de 108.6 mm y una abstracción inicial de 21.7 mm.

Cuadro 16
Números de curva asignados a las subcuencas del modelo distribuido

CN	**Subcuencas**
66.00	54, 59, 63, 67, 72, 79, 81, 93, 94
68.00	76
68.68	71, 82, 89
68.82	83
68.91	73, 105
69.95	87
72.04	85
72.11	50
72.14	55
73.51	69
73.75	90, 96
73.81	91
73.94	98

Nota. Elaboración propia a partir del Cuadro 8 del estudio de la DRTCA (2022). CN ponderado por área = 70.05.

3.12.5.3 Precipitación de entrada.

La precipitación de diseño que alimentó el modelo distribuido correspondió a la obtenida en el análisis de frecuencia (apartado anterior), asignada a las subcuencas según su estación de influencia. En el caso de la estación Chiara se empleó la serie depurada, sin el registro atípico de 2014, en coherencia con el diagnóstico de valor atípico descrito previamente; y, para garantizar la comparabilidad con el estudio oficial, en las estaciones de referencia se conservaron los valores consistentes con la DRTCA para los periodos de retorno de contraste.

3.12.5.4 Caudales de diseño: Integración de escenarios hidrológicos de referencia.

Los seis caudales de diseño que constituyeron la condición de contorno de entrada de la modelación hidráulica bidimensional no provienen de una única fuente, sino de una **integración deliberada de dos tipos de escenario**: Escenarios *reconstruidos* con el modelo distribuido propio (Tr = 25, 50, 100 y 200 años) y escenarios *de referencia*, tomados directamente del estudio oficial de la DRTCA (Tr = 140 y 500 años, los dos únicos periodos de retorno para los que la DRTCA publica un caudal de diseño). Esta integración no es una mezcla arbitraria de metodologías: Los dos escenarios de referencia cumplen, además, la función de **validar** la metodología distribuida propia. El parámetro de tránsito hidrológico Muskingum ($K = f \cdot T_c$, con $X = 0{,}2$) se calibró mediante un barrido de sensibilidad sobre el factor f, contrastando en cada caso el caudal reconstruido contra los dos valores oficiales de la DRTCA:

$f = K/T_c$	**Error Tr = 140**	**Error Tr = 500**
1.00 ($K = T_c$)	$-29{,}0$ %	$-30{,}8$ %
0.50 (adoptado)	$-6{,}7$ **%**	$-11{,}4$ **%**
0.30	$+16{,}1$ %	$+8{,}2$ %
0.15	$+44{,}7$ %	$+32{,}2$ %

El valor $f = 0{,}5$ ($K = 0{,}5\,T_c$) es el único que deja ambos escenarios de validación dentro del margen de error aceptado (menor al 15 %), con un sesgo de subestimación leve y consistente en signo; se adopta, además, como un supuesto físicamente razonable (aproximadamente la mitad del tiempo de concentración corresponde al tramo de cauce entre confluencias, y la otra mitad al flujo en ladera dentro de cada subcuenca), en lugar de un ajuste fino a los dos únicos puntos de validación disponibles, lo que sería estadísticamente frágil. Con $f = 0{,}5$, el modelo propio reconstruye Tr = 140 en 414.19 m^3/s y Tr = 500 en 667.80 m^3/s frente a los oficiales de 444.10 y 753.40 m^3/s (diferencias de $-6{,}7$ % y $-11{,}4$ %, respectivamente). Para las corridas de TELEMAC-2D en esos dos escenarios se optó por el valor oficial DRTCA, y no por el reconstruido, porque Tr = 140 años es el caudal de diseño normativo del puente proyectado y por ser, junto con Tr = 500, la única referencia externa disponible para contrastar la metodología propia; usar ahí el valor ya validado por esa misma comparación evita introducir una fuente de incertidumbre adicional en el escenario que sustenta el predimensionamiento de la defensa ribereña. Esta decisión implica que los escenarios Tr = 140 y 500 llevan una incertidumbre menor y mejor acotada que los otros cuatro, que dependen enteramente de la reconstrucción propia sin un punto de contraste externo; esta diferencia de incertidumbre entre escenarios debe tenerse en cuenta al comparar resultados entre periodos de retorno, y se reconoce como limitación en el apartado correspondiente.

Cuadro 17

Caudales máximos de diseño en el punto de descarga

Tr (años)	**Caudal (m^3/s)**	**Tipo de escenario**
25	192.74	Reconstruido (modelo propio)
50	267.28	Reconstruido (modelo propio)
100	360.91	Reconstruido (modelo propio)
140	444.10	Referencia (DRTCA, validación)
200	476.64	Reconstruido (modelo propio)
500	753.40	Referencia (DRTCA, validación)

Nota. Elaboración propia. Tr: Periodo de retorno. Escenarios de referencia (140 y 500 años): Valor oficial DRTCA, usado también para validar el modelo propio ($-6{,}7$ % y $-11{,}4$ % de diferencia frente a la reconstrucción propia). Escenarios reconstruidos (25, 50, 100 y 200 años): Modelo distribuido propio, sin punto de contraste oficial.

Cabe señalar que el modelo hidrológico oficial de la DRTCA reportó una advertencia de

inestabilidad del método de Muskingum en uno de sus tramos (*warning* 41109), asociada a una relación entre el parámetro de almacenamiento y el intervalo de cálculo fuera del rango de estabilidad. El criterio adoptado en el modelo propio, que fija $K = 0{,}5\,T_c$ y subdivide el tránsito en subpasos internos, evita esa condición y garantiza la estabilidad numérica del tránsito en todos los tramos de la red.

3.12.6. Generación de la malla de elementos finitos

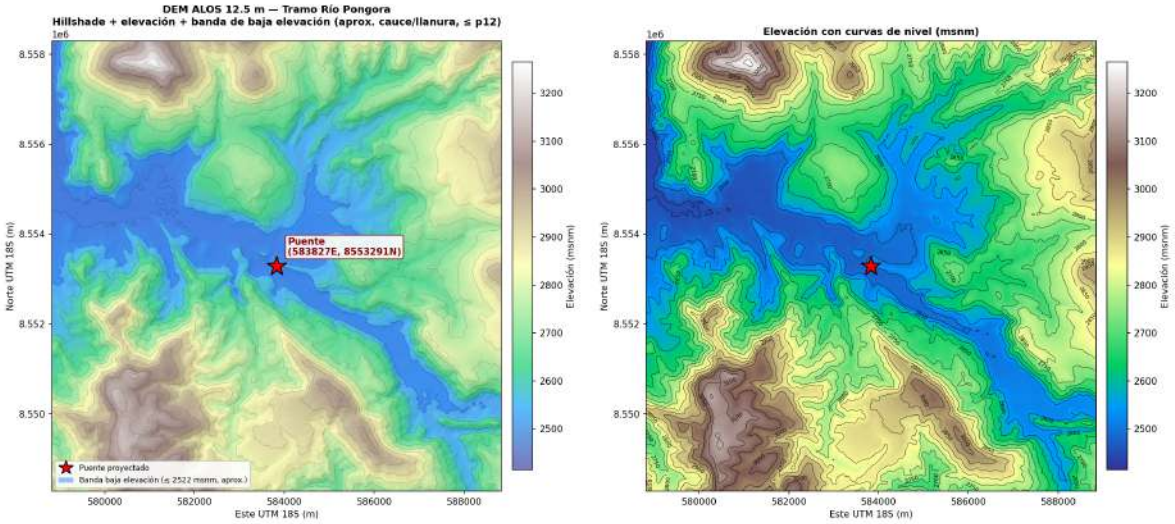
La modelación bidimensional por elementos finitos requiere discretizar el tramo de estudio en una malla de cálculo con la elevación del terreno asociada a cada nodo. La malla se generó mediante un flujo de trabajo propio en Python, basado en la triangulación de Delaunay restringida, y el programa Blue Kenue se empleó como herramienta de verificación visual del resultado. El proceso comprendió la definición del contorno del dominio, la generación de la malla triangular, la interpolación de la batimetría y la verificación de la calidad de los elementos.

3.12.6.1 Modelo digital de elevación de detalle.

Para el tramo del puente se empleó el modelo digital de elevación ALOS PALSAR de 12.5 m de resolución, de mayor detalle que el SRTM de 30 m usado en la delimitación de la cuenca. La Figura 26 presenta el relieve del tramo, con la banda de baja elevación que corresponde al cauce y a la llanura de inundación y el emplazamiento del puente proyectado (583 827 m E; 8 553 291 m N).

Figura 26

Modelo digital de elevación ALOS PALSAR de 12.5 m del tramo del río Pongora



Nota. Elaboración propia. Realce de sombreado, elevación y curvas de nivel; la estrella indica el puente proyectado.

3.12.6.2 Definición del contorno del dominio.

El contorno del dominio de cálculo se construyó con un script en Python (`generar_contorno_dominio_B.py`). El procedimiento extrajo del modelo digital de

elevación la banda de baja cota el percentil 15 de las elevaciones válidas, como aproximación al fondo del valle y aplicó un análisis de componentes principales sobre esos píxeles para obtener el eje principal del valle, que resultó orientado a N116° E. El extremo de aguas arriba se identificó muestreando la elevación real del terreno en ambos extremos del eje. Sobre esa orientación se construyó un rectángulo de 8 000×3 000 m centrado en el puente, con un área de 24.0 km^2 y un perímetro de 22.0 km, cuyos vértices se detallan en el Cuadro 18.

Cuadro 18

Vértices del dominio computacional "Opción B" (UTM WGS84, zona 18 S)

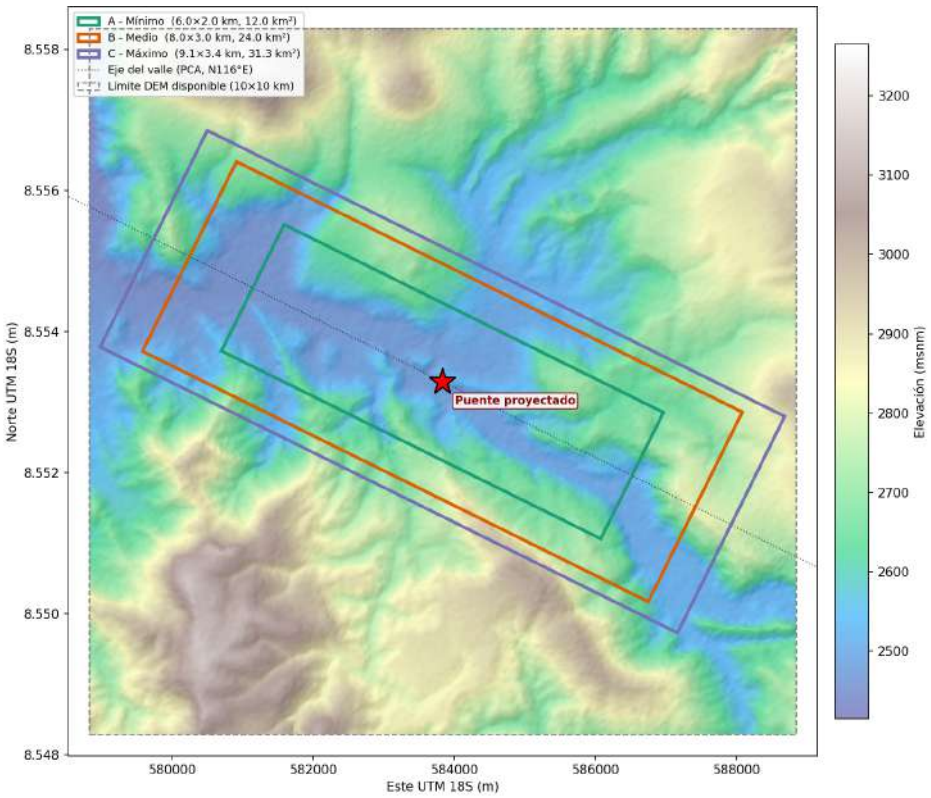
Vértice	Este (m)	Norte (m)	Ubicación
v0	588 077.22	8 552 860.10	Aguas arriba
v1	586 745.89	8 550 171.69	Aguas arriba
v2	579 576.78	8 553 721.90	Aguas abajo
v3	580 908.11	8 556 410.31	Aguas abajo

Nota. Elaboración propia. Sistema de coordenadas EPSG:32718.

Se plantearon tres alternativas de dominio centradas en el puente (Figura 27): Una mínima de 6.0×2.0 km, la media de 8.0×3.0 km y una máxima de 9.1×3.4 km. Se adoptó la alternativa media ("Opción B") porque ofrece un desarrollo suficiente aguas arriba y aguas abajo del puente para amortiguar el efecto de las fronteras sobre el tramo de interés, a la vez que conserva un margen holgado respecto al límite del modelo digital de elevación disponible (10×10 km); la alternativa mínima dejaba poco desarrollo en torno al puente, y la máxima se aproximaba en exceso al borde del terreno digital.

Figura 27

Alternativas de dominio computacional orientadas según el eje del valle

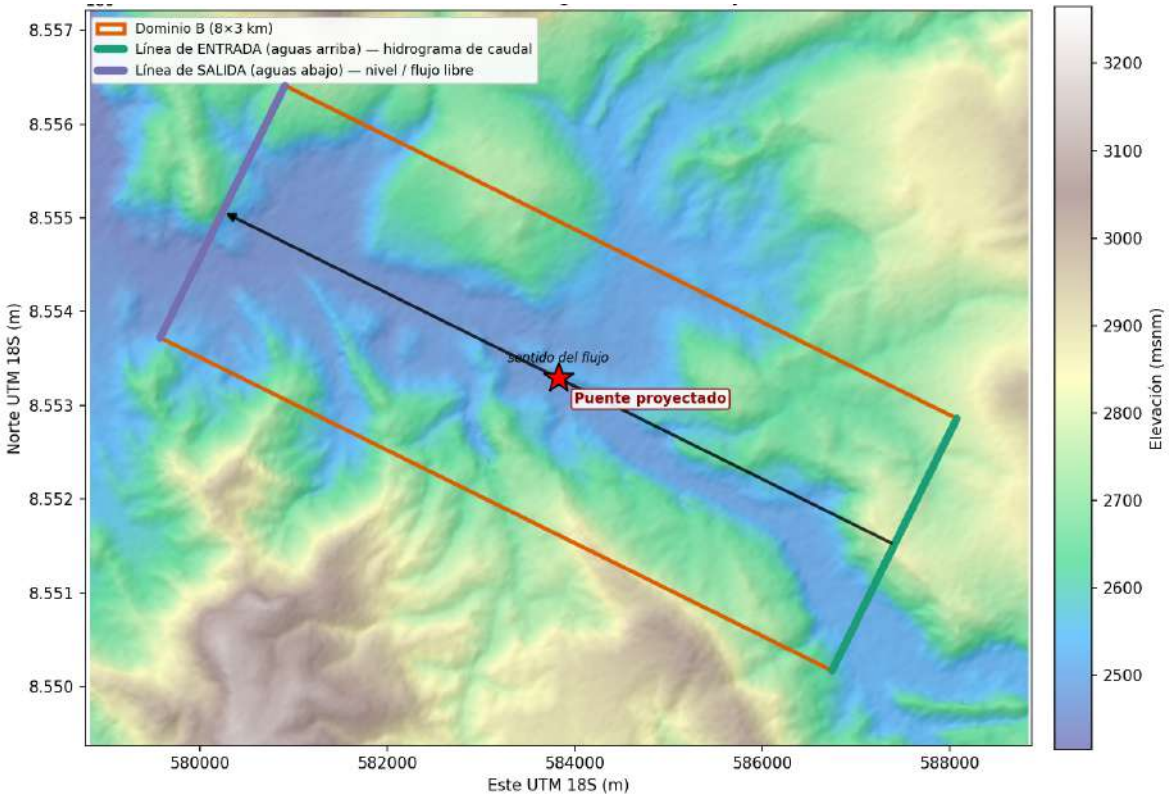


Nota. Elaboración propia. Las tres alternativas se orientaron a N116°E según el análisis de componentes principales de la banda de baja elevación.

En el contorno se definieron las dos fronteras líquidas del modelo (Figura 28): La de aguas arriba como entrada, por la que se prescribe el caudal de diseño, y la de aguas abajo como salida, por la que se impone el nivel de agua; los lados longitudinales se trataron como paredes cerradas.

Figura 28

Dominio computacional "Opción B" y fronteras líquidas del modelo



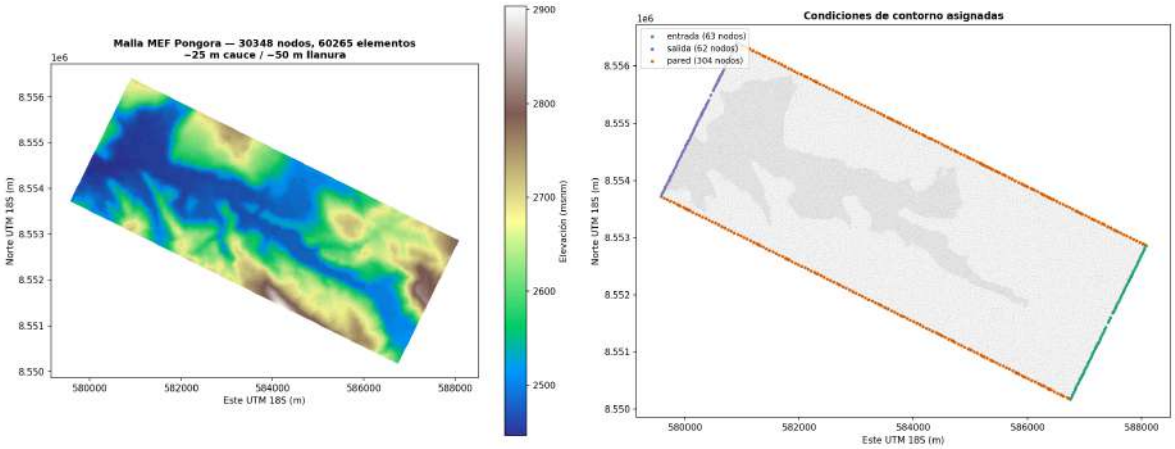
Nota. Elaboración propia. Entrada (aguas arriba) para el caudal de diseño y salida (aguas abajo) para el nivel.

3.12.6.3 Generación de la malla triangular.

La malla se generó con la biblioteca `Triangle`, que implementa la triangulación de Delaunay restringida con refinamiento de calidad. Se impuso el respeto de los segmentos del contorno, un ángulo mínimo de 20° y un área máxima de elemento variable por regiones. Se definieron dos tamaños objetivo de elemento: Una arista de 25 m en el cauce con un área máxima de 270.6 m^2 y de 50 m en la llanura de inundación con un área máxima de 1 082.5 m^2. La zona de refinamiento del cauce se delimitó como un corredor topográfico definido por las celdas del modelo digital con cota inferior o igual a 2 500 msnm, incorporado como frontera interna de la triangulación. La malla resultante quedó conformada por **30 348 nodos** y **60 265 elementos** triangulares; el 56.7 % de los elementos corresponde a la zona refinada del cauce (áreas menores o iguales a 350 m^2) y el 43.3 % restante a la llanura. Sobre los nodos del contorno se asignaron las condiciones de contorno: 63 nodos de entrada, 62 de salida y 304 de pared (Figura 29). El detalle de la triangulación se aprecia en la Figura 30.

Figura 29

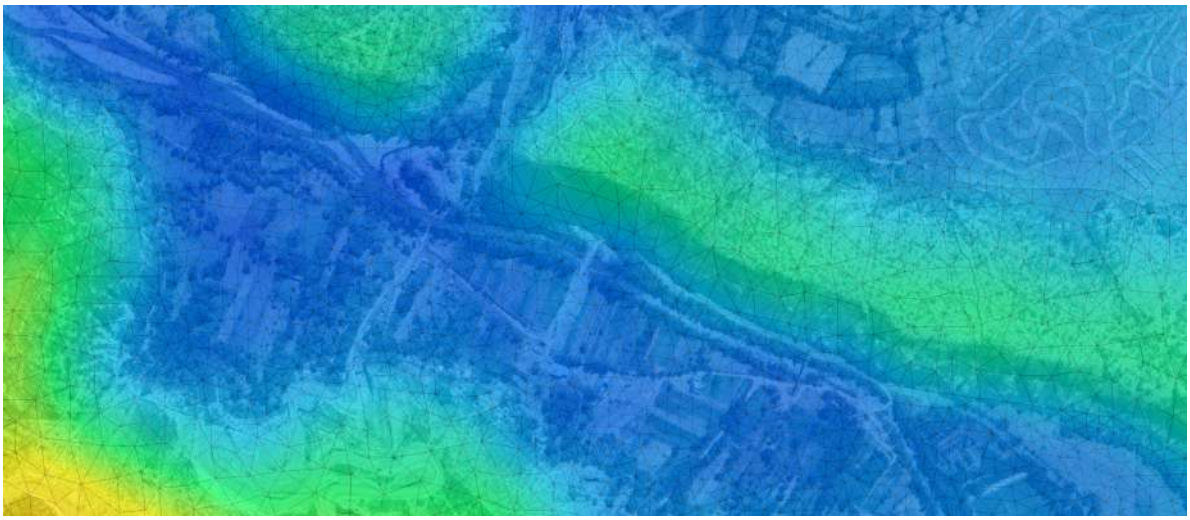
Malla de elementos finitos y condiciones de contorno asignadas



Nota. Elaboración propia. Malla de 30 348 nodos y 60 265 elementos; tamaño de elemento de ~25 m en el cauce y ~50 m en la llanura.

Figura 30

Detalle de la triangulación de la malla sobre el tramo del cauce

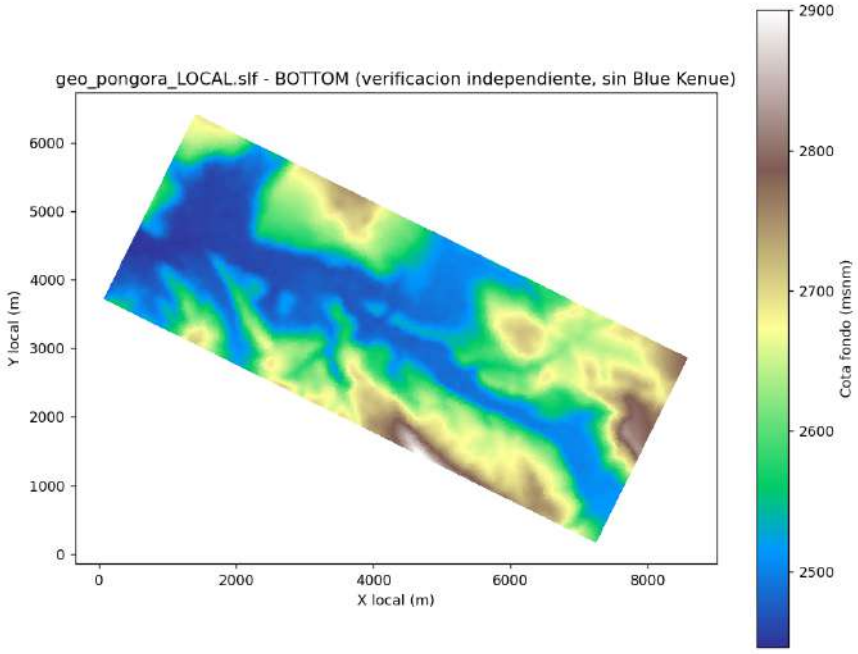


Nota. Elaboración propia. Se aprecia el refinamiento de los elementos en la zona del cauce.

3.12.6.4 Interpolación de la batimetría.

La elevación del terreno se transfirió del modelo digital a cada nodo de la malla mediante interpolación bilineal sobre la grilla del modelo digital (`dem_pongora_utm18s.asc`, 801×801 celdas de 12.5 m). El campo de batimetría resultante abarcó elevaciones de 2 446.05 a 2 903.88 msnm, sin ningún nodo sin dato. La Figura 31 presenta una verificación independiente de este campo, leído directamente del archivo de geometría.

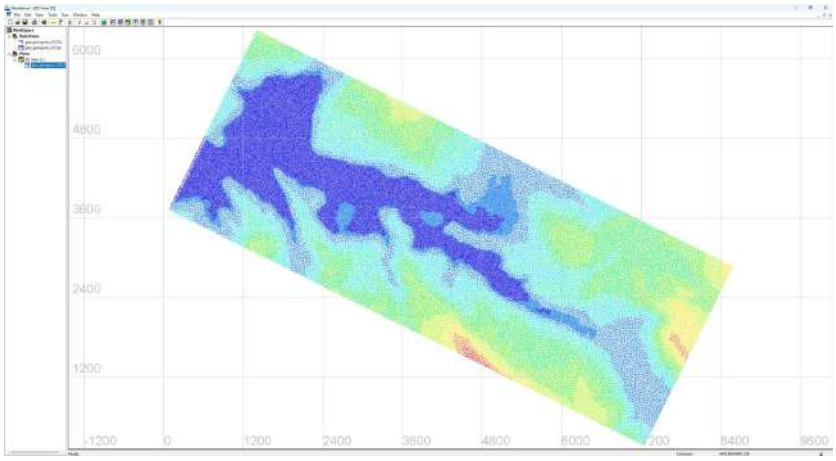
Figura 31
Campo de batimetría interpolado sobre la malla



Nota. Elaboración propia. Verificación independiente del campo de elevación de fondo del archivo

.

Figura 32
Verificación de la malla con la batimetría en Blue Kenue



Nota. Elaboración propia en Blue Kenue. Visualización de la malla con el campo de fondo interpolado.

3.12.6.5 Calidad de la malla.

La calidad de la malla se evaluó sobre el conjunto de sus 60 265 elementos (Cuadro 19). El ángulo mínimo medio de los elementos fue de 45.15° y solo cuatro elementos (el 0.007 %) presentaron un ángulo inferior a 20°, ubicados en las esquinas del dominio rectangular, donde el ángulo lo impone la geometría del contorno. La relación de aspecto media de 1.395 frente al valor 1.0 de un triángulo equilátero y el índice de calidad radio-ratio medio de 0.885 confirman una malla regular y de buena calidad geométrica, sin elementos degenerados.

Cuadro 19
Indicadores de calidad de la malla de elementos finitos

Indicador	Mínimo	Medio	Máximo
Área de elemento (m^2)	39.66	398.24	1 098.78
Longitud de arista (m)	10.03	29.72	93.75
Ángulo mínimo (°)	18.53	45.15	—
Ángulo máximo (°)	—	78.47	142.05
Relación de aspecto	—	1.395	2.845
Calidad radio-ratio	0.206	0.885	1.000

Nota. Elaboración propia. Índice radio-ratio: 1.0 corresponde al triángulo equilátero.

Con la malla, su batimetría y sus condiciones de contorno verificadas, el modelo quedó geométricamente listo para la configuración de la simulación hidrodinámica con TELEMAC-2D.

3.12.7. Configuración y simulación con TELEMAC-2D

La simulación hidrodinámica se ejecutó con el programa TELEMAC-2D, versión 9.1.1, que resuelve las ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant por el método de los elementos finitos. Se realizó una corrida por cada periodo de retorno, con una configuración numérica idéntica en las seis: Solo se modificaron el caudal de entrada, la cota de salida, el archivo de resultados y el título de la corrida, mientras que los treinta y un parámetros numéricos restantes se mantuvieron iguales, lo que garantiza la consistencia y la comparabilidad entre los escenarios.

3.12.7.1 Régimen de simulación y condición inicial.

El fenómeno real de crecida es de naturaleza no permanente, tal como se describió en el marco teórico: El tirante y la velocidad varían continuamente durante el paso de la avenida. Sin embargo, para efectos de la evaluación del peligro por inundación bajo distintos escenarios de caudal de diseño, la presente investigación adopta una aproximación en **régimen permanente**, que representa la condición más desfavorable y estabilizada de cada evento —el caudal pico sostenido— en lugar de la evolución completa del hidrograma. Bajo este alcance, cada crecida se modeló en régimen permanente, imponiendo en la frontera de entrada el caudal máximo de diseño del periodo de retorno como un valor constante, hasta alcanzar la estabilización del flujo. La condición inicial no se estableció en reposo, sino a partir de un cálculo de precalentamiento: Se partió de un tirante constante de 0.5 m y se hizo circular un caudal base de 10 m^3/s durante 24 horas, con lo que el dominio alcanzó un estado hidrodinámico estable; desde ese estado se reiniciaron las seis simulaciones de crecida. Cada corrida se extendió por 86 400 segundos (24 horas), con un paso de tiempo de 1.0 segundo, es decir, 86 400 pasos de cálculo, y con impresión de resultados cada 30 minutos; la duración de 24 horas se fijó como criterio práctico para garantizar la estabilización del flujo a partir del estado de precalentamiento, verificada

mediante la constancia del balance de masa y del campo de tirantes en los últimos pasos de cada corrida, antes que como un tiempo característico de una crecida real. En rigor, la denominación más precisa del producto de esta etapa es **simulación hidráulica bidimensional en régimen permanente para caudales de diseño asociados a diferentes periodos de retorno**, y así se adopta en el resto del documento.

3.12.7.2 Coeficiente de fricción.

La resistencia al flujo se representó con la ley de fricción de Manning, con un coeficiente uniforme de $n = 0{,}040$ s·m$^{-1/3}$ aplicado a los 30 348 nodos del dominio. Este valor es representativo de cauces naturales de montaña con lecho de gravas y bolonería y márgenes con vegetación, de acuerdo con los rangos del Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011).

3.12.7.3 Esquema numérico.

La advección de las componentes de velocidad se resolvió con el esquema N por segmentos (*edge-based N-scheme*) y la del tirante con el esquema PSI conservativo. El sistema lineal se trató mediante la formulación de la ecuación de onda, resuelto con el método del gradiente conjugado con una precisión de 1×10^{-4} y precondicionamiento diagonal, sobre elementos lineales P1 para la velocidad y el tirante. La discretización temporal empleó una implicitación total en el tirante y semi-implícita (0.55) en la velocidad, con una difusividad de velocidad de 1.0 m^2/s. El secado y mojado de las márgenes se activó mediante la opción de bancos secos, con tratamiento de tirantes negativos por control de flujo y corrección de continuidad. El Cuadro 20 resume la configuración adoptada.

Cuadro 20
Parámetros de configuración de la simulación con TELEMAC-2D (comunes a las seis corridas)

Parámetro	Valor
Ley de fricción de fondo	Manning
Coeficiente de fricción (n)	0.040 s·m$^{-1/3}$ (uniforme)
Paso de tiempo	1.0 s
Número de pasos de tiempo	86 400 (24 h)
Impresión de resultados	cada 1 800 s (30 min)
Advección de velocidad	Esquema N por segmentos
Advección del tirante	Esquema PSI conservativo
Solver	Gradiente conjugado
Precisión del solver	1×10^{-4}
Precondicionamiento	Diagonal
Tratamiento del sistema lineal	Ecuación de onda
Discretización espacial	Elementos lineales P1
Implicitación en tirante / velocidad	1.0 / 0.55
Difusividad de velocidad	1.0 m^2/s
Bancos secos	Activados (opción 1)
Tratamiento de tirantes negativos	Control de flujo

Nota. Elaboración propia a partir de los archivos de cálculo de TELEMAC-2D.

3.12.7.4 Condiciones de contorno por periodo de retorno.

En la frontera de aguas arriba se prescribió el caudal máximo de diseño de cada periodo de retorno, y en la de aguas abajo la cota de la superficie del agua, calculada como el tirante normal de Manning para ese caudal (canal de 30 m de ancho, pendiente 0.0073 y cota de fondo 2 447.11 msnm). El Cuadro 21 presenta los valores impuestos en cada corrida.

Cuadro 21
Condiciones de contorno impuestas en cada simulación

Tr (años)	Caudal de entrada (m^3/s)	Cota de salida (msnm)
25	192.74	2 449.147
50	267.28	2 449.616
100	360.91	2 450.147
140	444.10	2 450.582
200	476.64	2 450.746
500	753.40	2 452.024

Nota. Elaboración propia. Cota de salida = tirante normal de Manning para el caudal de diseño.

3.12.7.5 Ejecución y verificación.

Las seis simulaciones se ejecutaron en TELEMAC-2D v9.1.1 en modo serial, con tiempos de cálculo de entre 30 y 35 minutos por corrida. La correcta imposición de las condiciones de contorno se verificó en el registro de cada simulación, que reportó el caudal entrante por la frontera de aguas arriba coincidente con el caudal de diseño y un caudal saliente equivalente por la frontera de aguas abajo. La calidad de la solución se confirmó con el balance de masa, cuyo error relativo en volumen se mantuvo en el orden de 10^{-13} a 10^{-15} en las seis corridas, lo que indica una conservación de la masa prácticamente exacta. Los resultados de tirante, velocidad y número de Froude obtenidos se analizan en el siguiente apartado.

3.12.8. Resultados de la modelación hidráulica

De cada simulación se obtuvieron los campos de tirante, velocidad, superficie libre y número de Froude en los 30 348 nodos del dominio. El análisis se realizó sobre el estado estabilizado del flujo, correspondiente al último paso de cálculo (24 horas de simulación), para los seis periodos de retorno.

3.12.8.1 Tirante y área de inundación.

El Cuadro 23 presenta el tirante representativo (percentil 99.9) y el área de inundación por periodo de retorno. Se adoptó el percentil 99.9 de la distribución espacial como valor representativo, y no el máximo nodal absoluto, con el fin de descartar valores puntuales no representativos: El máximo nodal crudo (entre 15.9 y 17.3 m) se localizaba de forma sistemática en un nodo contiguo a la frontera de entrada, y el máximo del campo interpolado (14.0 m, idéntico e insensible al caudal en los seis escenarios) correspondía a una depresión cerrada del terreno que se llenó durante el precalentamiento y no drena; ninguno de los dos constituye un resultado hidráulico del tramo. El área de inundación se determinó sobre el campo de tirante con un umbral de 0.10 m.

3.12.8.2 Sensibilidad del área inundada al umbral de tirante.

El umbral $h \geq 0{,}10$ m no es un valor arbitrario ni definitivo: Se evaluó su efecto recalculando el área inundada bajo cinco umbrales distintos (0.01, 0.05, 0.10, 0.30 y 1.00 m) sobre el mismo campo de tirante de cada escenario, sin necesidad de volver a simular. El Cuadro 22 resume el resultado.

Cuadro 22
Área inundada (ha) según el umbral de tirante adoptado, por periodo de retorno

Tr (años)	$h \geq$**0.01 m**	$h \geq$**0.05 m**	$h \geq$**0.10 m**	$h \geq$**0.30 m**	$h \geq$**1.00 m**
25	482.75	325.78	296.77	240.67	140.39
50	500.75	343.25	311.78	255.31	155.75
100	512.80	358.28	328.08	271.38	172.14
140	516.05	367.36	339.81	281.67	183.91
200	523.75	370.64	342.98	285.23	188.55
500	542.39	395.53	368.00	310.05	218.56

Nota. Elaboración propia a partir del post-procesamiento de los rasters de tirante (12.5 m) de TELEMAC-2D.

Como era de esperar, el área inundada decrece de forma monótona a medida que el umbral aumenta —de 482.75 a 140.39 ha entre 0.01 y 1.00 m para Tr = 25 años—, lo que confirma que buena parte del dominio mojado corresponde a láminas delgadas en los bordes de la mancha. El umbral de 0.10 m se adopta porque separa razonablemente el área con significancia hidráulica —de interés para la gestión del riesgo— de las franjas de encharcamiento marginal sin representar un cambio abrupto en la tendencia: El área bajo 0.10 m se ubica de forma consistente entre los valores de 0.05 y 0.30 m para los seis escenarios, sin saltos ni inversiones de orden entre periodos de retorno.

Cuadro 23
Tirante representativo (percentil 99.9) y área de inundación por periodo de retorno

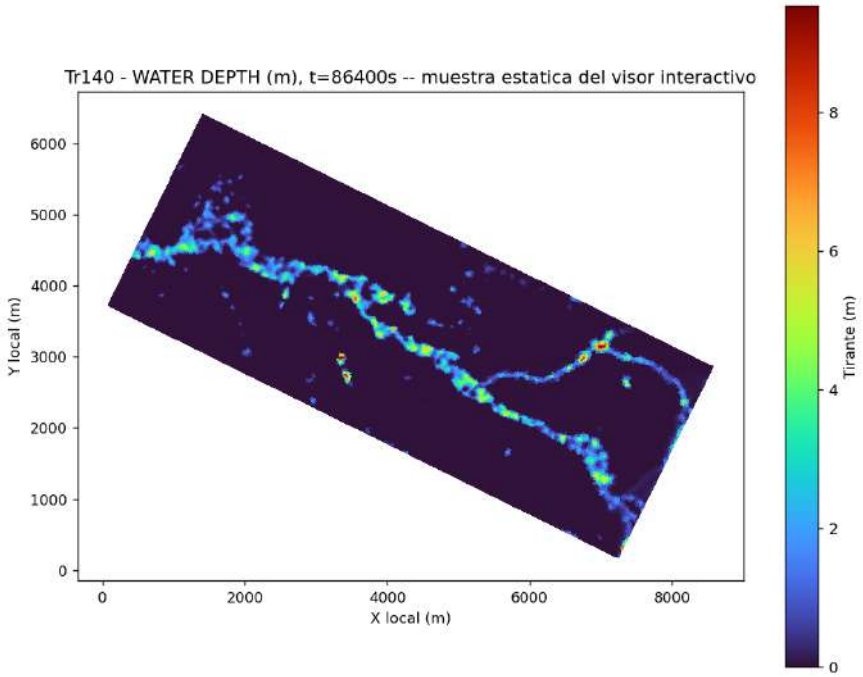
Tr (años)	Caudal (m^3/s)	Cota de salida (msnm)	Tirante repr. (m)	Área inundada (ha)
25	192.74	2 449.147	8.75	296.77
50	267.28	2 449.616	8.91	311.78
100	360.91	2 450.147	9.19	328.08
140	444.10	2 450.582	9.37	339.81
200	476.64	2 450.746	9.39	342.98
500	753.40	2 452.024	9.66	368.00

Nota. Elaboración propia. Tirante representativo = percentil 99.9 del campo; área con tirante $\geq$0.10 m.

El campo de tirante del evento de 140 años se presenta en la Figura 33, y el de 500 años en la Figura 34. El tirante representativo se concentra en el cauce principal y alcanza valores máximos cercanos a 9.7 m en los tramos encañonados de mayor confinamiento.

Figura 33

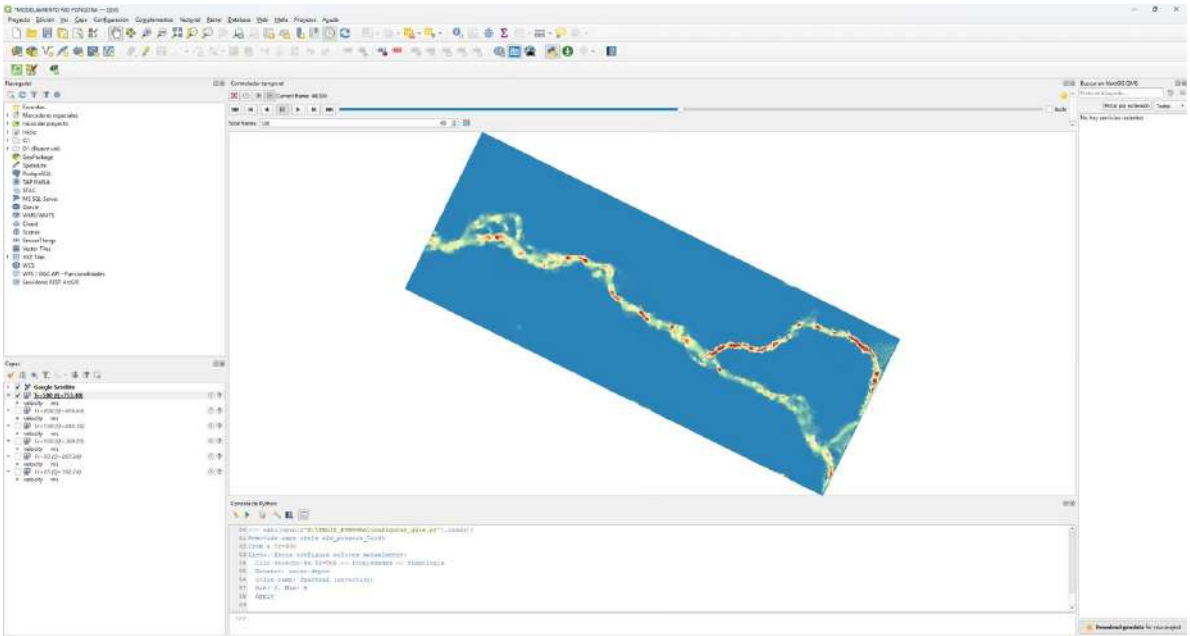
Campo de tirante de agua para el periodo de retorno de 140 años



Nota. Elaboración propia a partir del resultado de TELEMAC-2D. Tirante en el estado estabilizado (t = 24 h).

Figura 34

Mancha de inundación para el periodo de retorno de 500 años



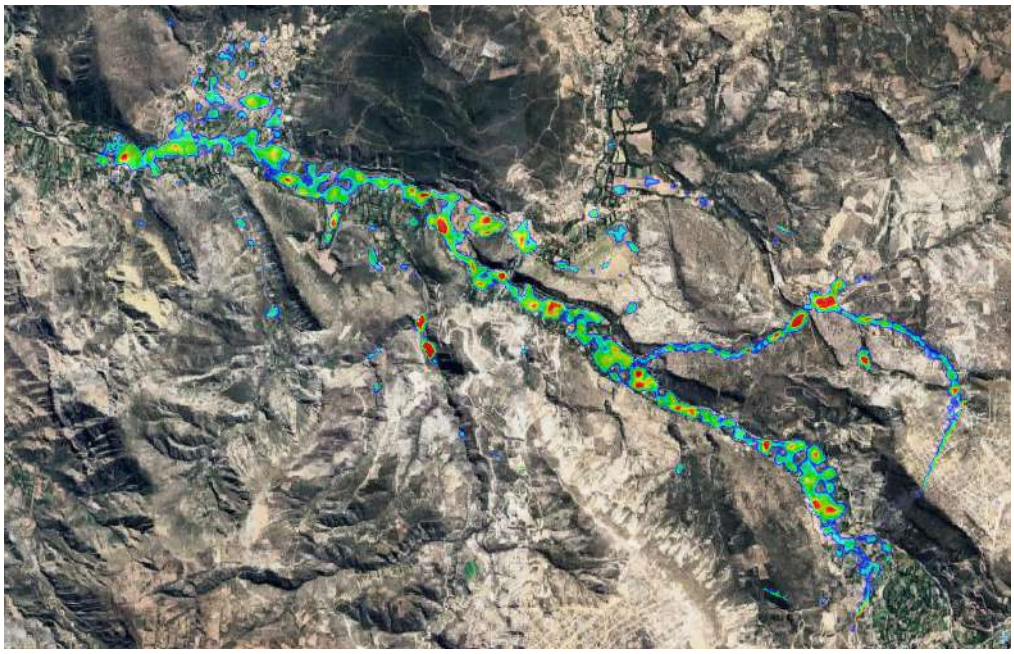
Nota. Elaboración propia. Tirante de agua del evento de 500 años sobre imagen satelital.

3.12.8.3 Evolución de la mancha de inundación.

La comparación de las manchas de inundación de los seis periodos de retorno, a una misma escala (Figuras 35 a 37), evidencia un comportamiento característico de un valle encañonado. Mientras que el caudal de diseño se incrementa un 291 % entre el periodo de 25 y el de 500 años (de 192.74 a 753.40 m^3/s), el área de inundación aumenta solo un 24 % (de 296.77 a 368.00 ha con el umbral de 0.10 m). Es decir, el confinamiento lateral del valle limita la expansión horizontal de la lámina de agua, de modo que el aumento del caudal se traduce principalmente en un incremento del tirante más que de la extensión inundada; esta tendencia se acentúa en el cauce, donde el área con tirante superior a 1 m crece un 56 % entre ambos escenarios.

Figura 35

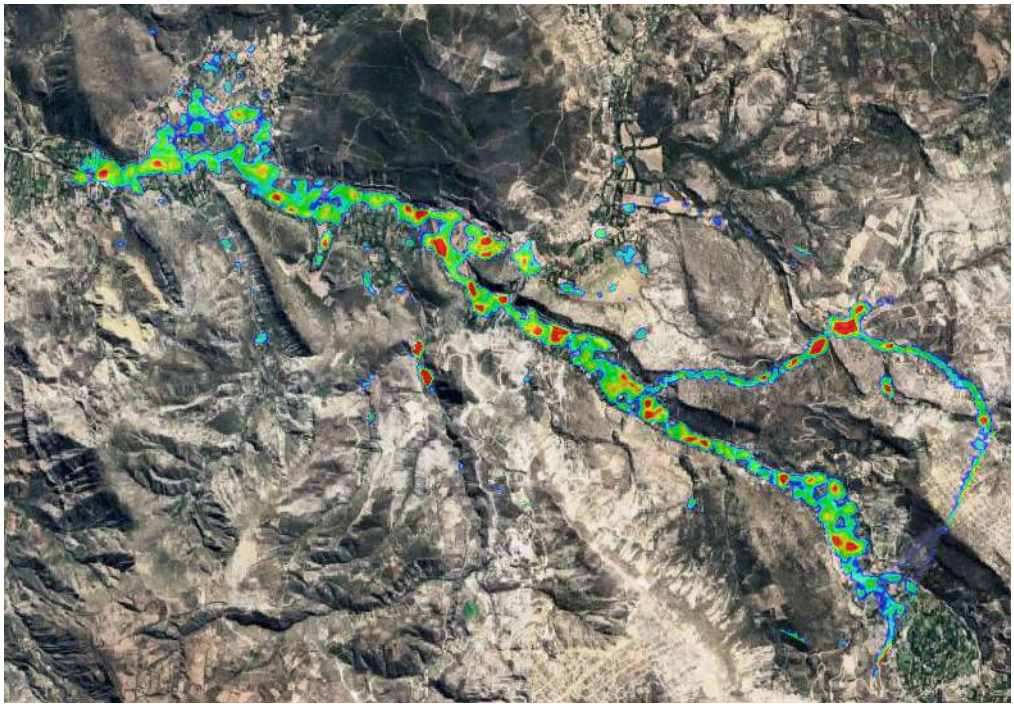
Mancha de inundación para el periodo de retorno de 25 años



Nota. Elaboración propia a partir del resultado de TELEMAC-2D.

Figura 36

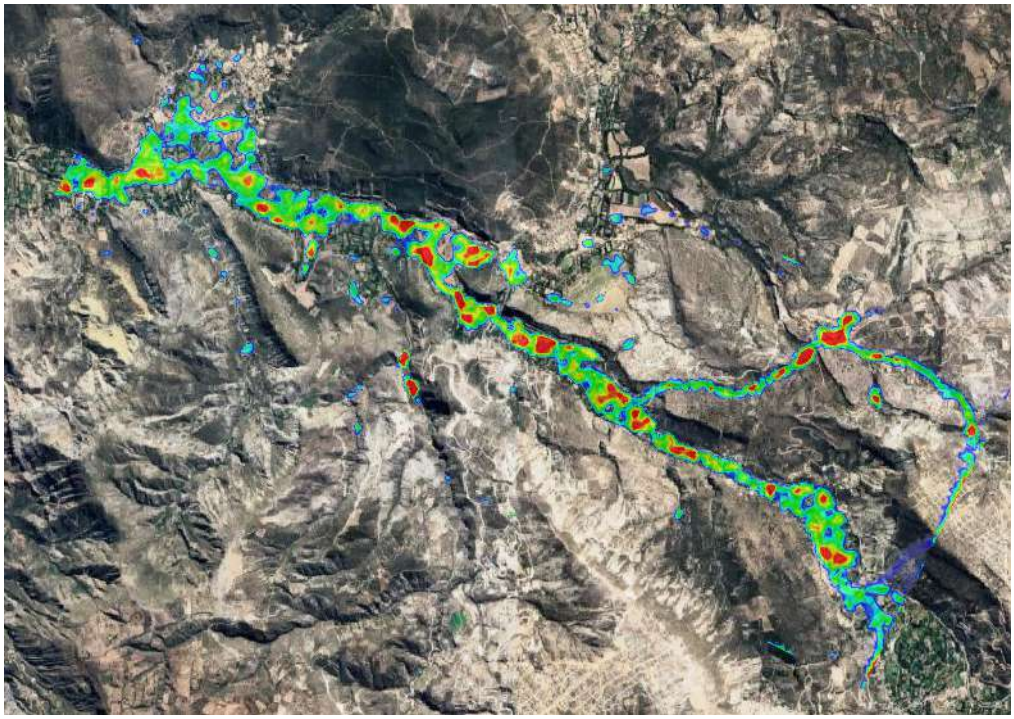
Mancha de inundación para el periodo de retorno de 140 años



Nota. Elaboración propia a partir del resultado de TELEMAC-2D.

Figura 37

Mancha de inundación para el periodo de retorno de 500 años



Nota. Elaboración propia a partir del resultado de TELEMAC-2D.

3.12.8.4 Velocidades y régimen del flujo.

Las velocidades presentaron una fuerte variación espacial. En el evento de 500 años, el valor máximo alcanzó 7.27 m/s, pero la mediana del área inundada fue de apenas 0.31 m/s: Las velocidades elevadas (superiores a 3 m/s) se concentran en el cauce encañonado, mientras que la llanura de inundación presenta una lámina lenta. En cuanto al régimen del flujo, la modelación indicó un **predominio del régimen subcrítico**: La mediana del número de Froude se mantuvo entre 0.15 y 0.26 en todos los escenarios. Solo entre el 2 % (periodo de 25 años) y el 8 % (periodo de 500 años) del área inundada superó el número de Froude unitario, con transiciones locales a régimen supercrítico concentradas en los tramos encañonados de mayor pendiente. Estas transiciones subcrítico–supercrítico dan lugar a resaltos hidráulicos localizados, que son las zonas donde se concentraría el potencial erosivo del flujo.

3.12.8.5 Resultados en los puntos de control.

Para caracterizar la variación del tirante a lo largo del tramo se extrajeron los resultados en cuatro puntos de control, entre ellos el eje del puente proyectado, ubicado en el punto de menor cota de fondo (thalweg) de su sección transversal (Cuadro 24). El tirante aumenta de forma consistente con el periodo de retorno en los cuatro puntos, y en el eje del puente alcanza entre 2.59 m (25 años) y 4.20 m (500 años). En los cuatro puntos el flujo resultó subcrítico. En el eje del puente, en particular, la velocidad fue baja (entre 0.08 y 0.62 m/s) y el número de Froude muy reducido (entre 0.02 y 0.10): El puente se emplaza en una zona de remanso, precedida por un tramo de pendiente suave y seguida por una caída del cauce, de modo que las mayores velocidades —y con ellas el mayor potencial erosivo— se localizan inmediatamente aguas abajo del eje, en la zona de la caída. Esta condición debe considerarse en el planteamiento de las medidas de protección ribereña.

Cuadro 24
Tirante, velocidad y producto tirante-velocidad en los puntos de control, por periodo de retorno

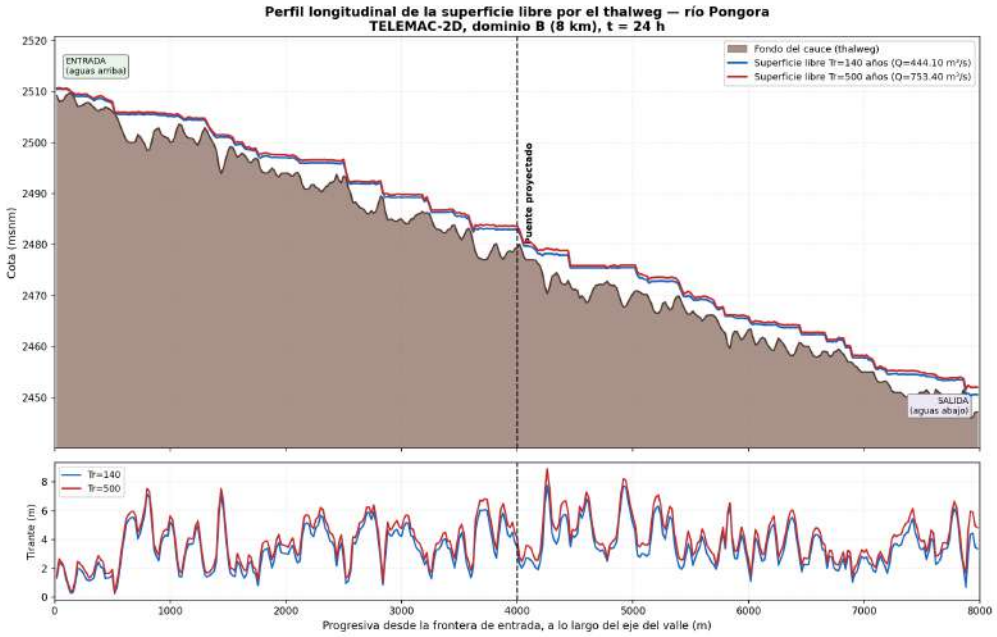
Punto de control	Variable	Tr 25	Tr 50	Tr 100	Tr 140	Tr 200	Tr 500
Aguas arriba	T (m)	2.10	2.25	2.49	2.72	2.81	3.26
	V (m/s)	0.07	0.09	0.12	0.14	0.15	0.21
	$E = V \cdot T$ (m^2/s)	0.14	0.21	0.29	0.39	0.43	0.68
Eje del puente	T (m)	2.59	2.92	3.27	3.53	3.61	4.20
	V (m/s)	0.08	0.11	0.25	0.30	0.34	0.62
	$E = V \cdot T$ (m^2/s)	0.21	0.33	0.81	1.07	1.23	2.59
Confluencia	T (m)	2.41	2.62	2.90	3.09	3.12	3.55
	V (m/s)	1.01	1.28	1.51	1.68	1.71	2.19
	$E = V \cdot T$ (m^2/s)	2.44	3.35	4.38	5.20	5.33	7.77
Aguas abajo	T (m)	4.74	4.92	5.08	5.21	5.28	5.64
	V (m/s)	0.49	0.63	0.76	0.93	0.91	1.11
	$E = V \cdot T$ (m^2/s)	2.33	3.10	3.83	4.85	4.81	6.27

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de TELEMAC-2D. T: Tirante; V: Velocidad media del flujo; $E = V \cdot T$: Producto tirante-velocidad, indicador de peligrosidad (Musolino et al., 2020) (Ecuación 6). El valor de *Eje del puente* se interpoló en su ubicación reubicada sobre el thalweg (583 819.23 E, 8 553 275.32 N), coherente con el tirante ya reportado en versiones previas de este cuadro.

3.12.8.6 Perfil longitudinal de la superficie libre.

El perfil longitudinal de la superficie del agua a lo largo del thalweg (Figura 38) muestra el descenso del nivel desde la entrada del dominio con una cota de fondo de 2 509.18 msnm hasta la salida 2 447.20 msnm, con un desnivel de 61.98 m y una pendiente media del thalweg de 0.00779 m/m. El tirante a lo largo del cauce alcanzó valores medios de 3.51 m para el periodo de 140 años y de 4.02 m para el de 500 años, con máximos de 7.75 y 8.90 m respectivamente. Este perfil aporta dos verificaciones independientes de la consistencia del modelo: La pendiente media del thalweg (0.00779 m/m) prácticamente coincide con la pendiente de 0.0073 empleada en la condición de contorno de salida (una diferencia del 6.7 %), y la cota de fondo en la salida (2 447.20 msnm) coincide con la de 2 447.11 msnm adoptada en esa misma condición (una diferencia de 9 cm). Además, el tirante máximo real a lo largo del thalweg (8.90 m para 500 años) es coherente con el tirante representativo (percentil 99.9) del Cuadro 23, lo que respalda que los máximos nodales cercanos a 17 m corresponden a artefactos y no al comportamiento real del flujo.

Figura 38
Perfil longitudinal de la superficie libre (periodos de 140 y 500 años)



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de TELEMAC-2D. La posición del puente proyectado se indica en la progresiva 4 000 m.

En conjunto, los resultados muestran que el río Pongora, en el tramo del puente proyectado, responde a las crecidas de diseño con incrementos moderados del área inundada y aumentos apreciables del tirante en el cauce, bajo un régimen predominantemente subcrítico con transiciones locales a supercrítico. Estos campos de tirante y velocidad constituyen la base para la verificación de campo y la evaluación del peligro por inundación que se desarrollan a continuación.

3.12.9. Verificación de campo

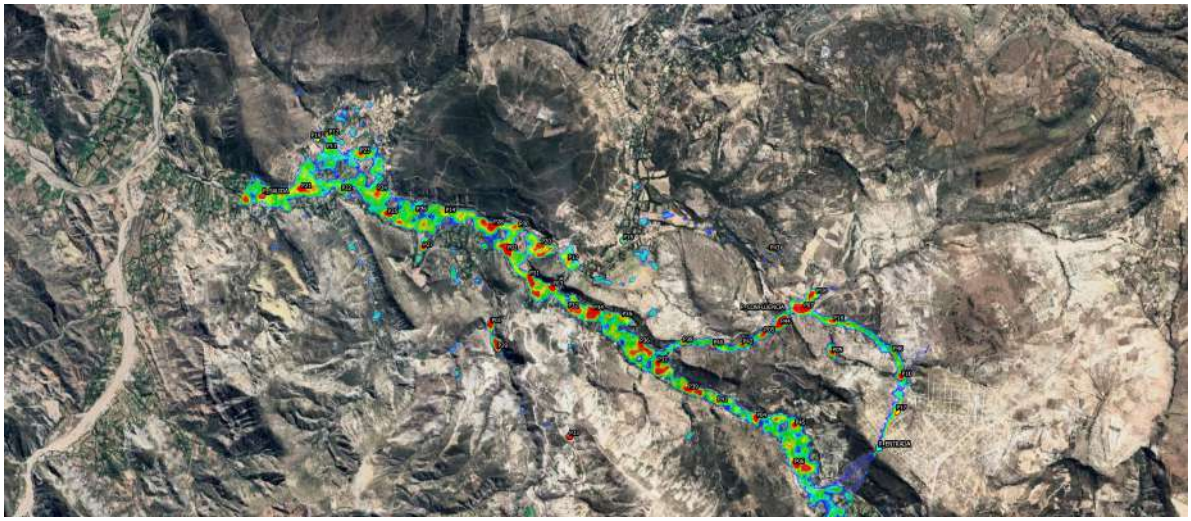
Con el fin de contrastar empíricamente los resultados de la modelación con la realidad del tramo, se realizó una verificación de campo orientada a las zonas de mayor peligro identificadas por el modelo. La verificación comprendió la selección de puntos de control sobre los resultados de TELEMAC-2D, una campaña de reconocimiento con registro fotográfico georreferenciado y el contraste de la evidencia observada con lo predicho por el modelo.

3.12.9.1 Puntos de verificación.

A partir de los campos de tirante simulados se definieron 49 puntos de verificación, ubicados sobre las zonas de mayor tirante del modelo y complementados con criterios de exposición, vulnerabilidad y cruces de infraestructura. Los puntos se clasificaron según su criterio dominante —hidráulico, exposición, vulnerabilidad, confluencia y control— y de ellos se priorizaron 23 para la visita de campo (Figura 39 y Figura 40). De los 16 puntos de criterio hidráulico, 11 se localizan en la margen izquierda y 5 en la derecha, proporción coherente con que la margen izquierda —donde se asientan las parcelas y viviendas— sea

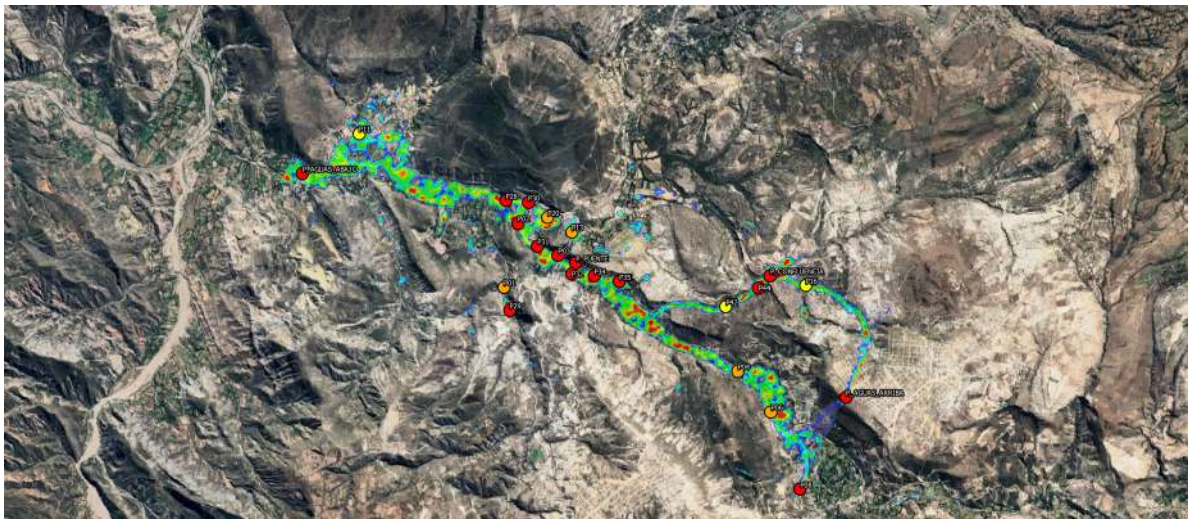
la más comprometida en el tramo del puente.

Figura 39
Puntos de verificación sobre la mancha de inundación de 500 años



Nota. Elaboración propia. Los 46 puntos numerados y los puntos de entrada, confluencia y salida.

Figura 40
Puntos prioritarios de verificación según nivel de criticidad



Nota. Elaboración propia. La simbología de semáforo indica el nivel de prioridad de cada punto.

3.12.9.2 Campaña de campo.

La visita de campo se realizó el 4 de septiembre de 2026 y recorrió tres sectores representativos del tramo, con registro fotográfico georreferenciado mediante GPS y mediciones directas con wincha. El primer sector correspondió al entorno del puente proyectado, con sus parcelas de cultivo de hortalizas y el punto de aforo (Figura 41). El segundo sector abarcó la sección de aforo donde se midió el ancho del cauce el puente colgante peatonal, la compuerta de riego y una vivienda emplazada en zona inestable

(Figuras 42 y 43). El tercer sector, en el tramo de aguas abajo, correspondió a los muros de gaviones existentes (Figura 44).

Figura 41

Parcelas de cultivo en la margen del río, con el puente proyectado al fondo



Nota. Registro de campo georreferenciado, 4 de septiembre de 2026.

Figura 42

Medición del ancho del cauce en la sección de aforo



Nota. Registro de campo georreferenciado, 4 de septiembre de 2026.

Figura 43
Vivienda emplazada en zona ribereña expuesta



Nota. Registro de campo georreferenciado, 4 de septiembre de 2026.

Figura 44
Muro de gaviones existente en el tramo de aguas abajo



Nota. Registro de campo georreferenciado, 4 de septiembre de 2026.

3.12.9.3 Contraste entre el modelo y la evidencia de campo.

En los sectores recorridos se verificaron directamente tres de los puntos de control, cuyos tirantes simulados para el periodo de retorno de 500 años se presentan en el Cuadro 25. Dos de los tres puntos verificados se ubican en la margen izquierda, que es la que el modelo señala como la más afectada y la que concentra las parcelas y viviendas. La evidencia observada resultó coherente con lo predicho por el modelo: Los muros de gaviones existentes coinciden con un sector de tirantes elevados; la vivienda emplazada en zona inestable se sitúa en un sector de exposición identificado; y las parcelas de cultivo se distribuyen justamente sobre la margen que el modelo indica como inundable.

Cuadro 25

Puntos verificados en campo y su tirante simulado (Tr 500)

Punto	Margen	Tirante simulado (m)	Velocidad simulada (m/s)
Eje del puente	Derecha	2.32	0.26
P32	Izquierda	4.01	1.62
P03	Izquierda	8.39	0.84

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de TELEMAC-2D para el periodo de retorno de 500 años (Tr 500). Tirante y velocidad son valores simulados, no medidos en campo; lo verificado en campo en cada punto fue la existencia de defensas, viviendas y parcelas, no el tirante ni la velocidad.

3.12.9.4 Validación cruzada del área de cultivo.

Como validación independiente, se contrastó el área de cultivo inundada según el modelo con la declarada por la Autoridad Nacional del Agua para el tramo. El modelo estima que, en la margen izquierda del tramo, se inundan 38.94 hectáreas de cultivo para el periodo de retorno de 500 años, frente a las 48.10 hectáreas de superficie de cultivos expuesta que declara la ficha oficial de la ANA. El modelo reproduce, en términos de orden de magnitud, el 81 % de la superficie declarada. Existe una correspondencia espacial y de orden de magnitud entre ambas fuentes; sin embargo, la comparación no constituye una validación cuantitativa estricta debido a que ambas fuentes utilizan criterios diferentes para definir la superficie afectada —la ficha de la ANA contabiliza la parcela completa expuesta, y el modelo, solo la fracción bajo lámina de agua—.

3.12.9.5 Alcance y limitaciones de la verificación.

La verificación de campo tuvo un carácter focalizado: De los 23 puntos prioritarios, se verificaron directamente 3 en la primera visita, concentrados en el sector del puente, y lo verificado en esos puntos fue la correspondencia espacial con elementos expuestos (defensas, viviendas, parcelas), no una medición directa de tirante, velocidad, caudal o cota de inundación durante una avenida. La comprobación exhaustiva de la totalidad de los puntos, y una validación física cuantitativa propiamente dicha, quedan como recomendación para trabajos posteriores. La coincidencia observada en los sectores

verificados, junto con la correspondencia de orden de magnitud del área de cultivo, respalda la correspondencia cualitativa de los resultados del modelo como base para la evaluación del peligro y la formulación de las medidas de protección que se desarrollan en los apartados siguientes.

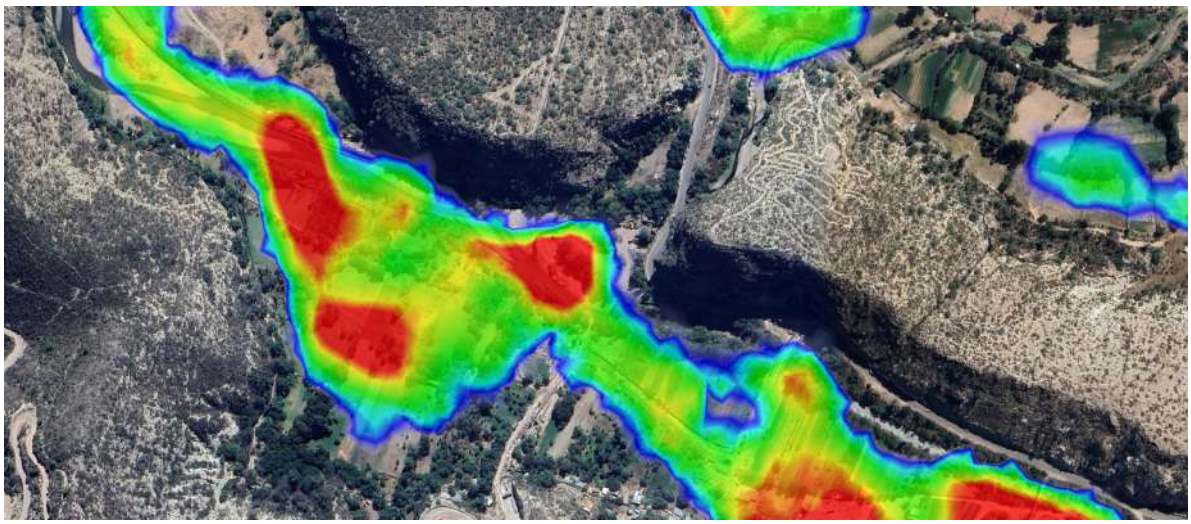
3.12.10. Identificación de zonas de peligro

A partir de los campos de tirante y velocidad simulados, y con el respaldo de la verificación de campo, se identificaron las zonas de mayor peligro por inundación del tramo, se analizó la distribución del peligro entre ambas márgenes, se caracterizaron los elementos expuestos y se delimitó un sector de peligro relevante. La clasificación del peligro se sustentó en los dos parámetros hidráulicos que gobiernan el daño —el tirante y la velocidad del flujo—, obtenidos de la modelación para cada periodo de retorno.

3.12.10.1 Zonas de peligro por tirante y velocidad.

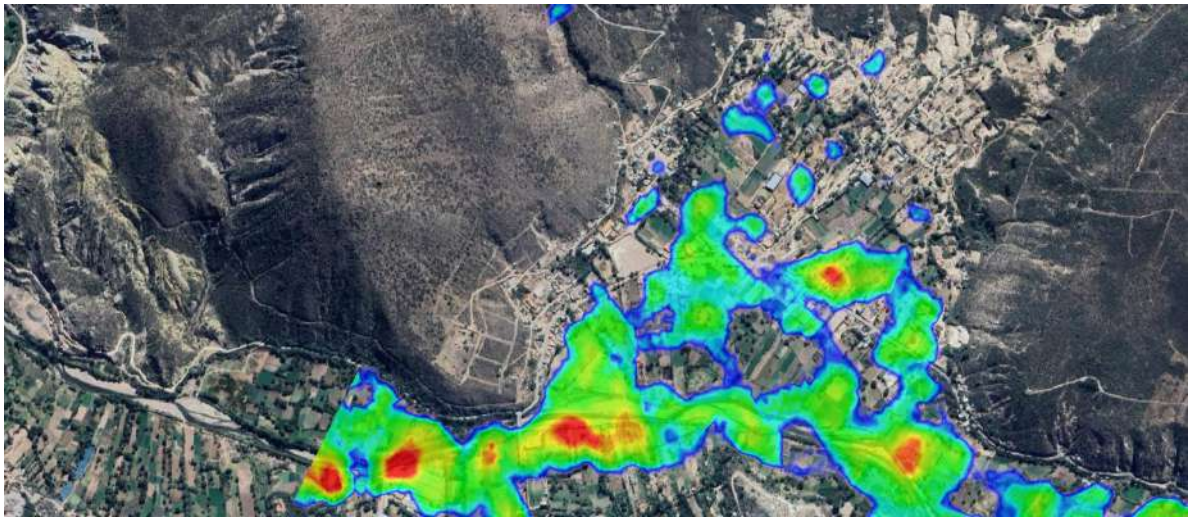
El análisis del tramo distingue cuatro sectores de comportamiento diferenciado. El sector del puente proyectado concentra el interés principal del estudio (Figura 45). Aguas abajo se sitúa el sector con mayor presencia de viviendas (Figura 46), seguido de un sector predominantemente agrícola, ocupado por parcelas de cultivo sobre la margen inundable (Figura 47), y del sector de la confluencia con el tributario (Figura 48). En todos ellos, el peligro se concentra en el cauce principal y en la franja de llanura inmediata, donde el modelo indica un régimen predominantemente subcrítico con transiciones locales a supercrítico en los tramos de mayor pendiente.

Figura 45
Zona del puente proyectado



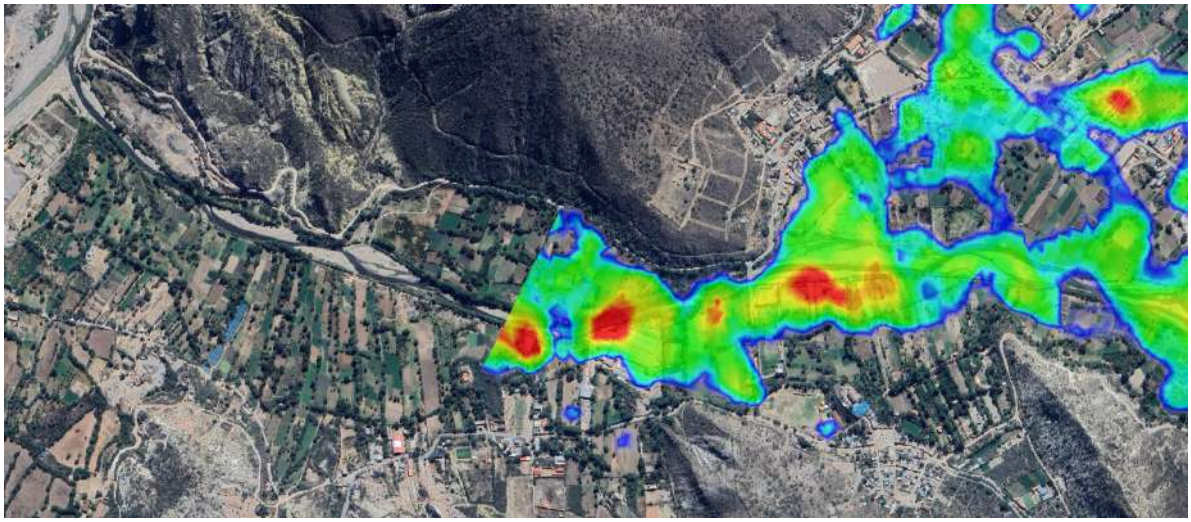
Nota. Elaboración propia a partir de la mancha de inundación de 500 años.

Figura 46
Zona con presencia de viviendas



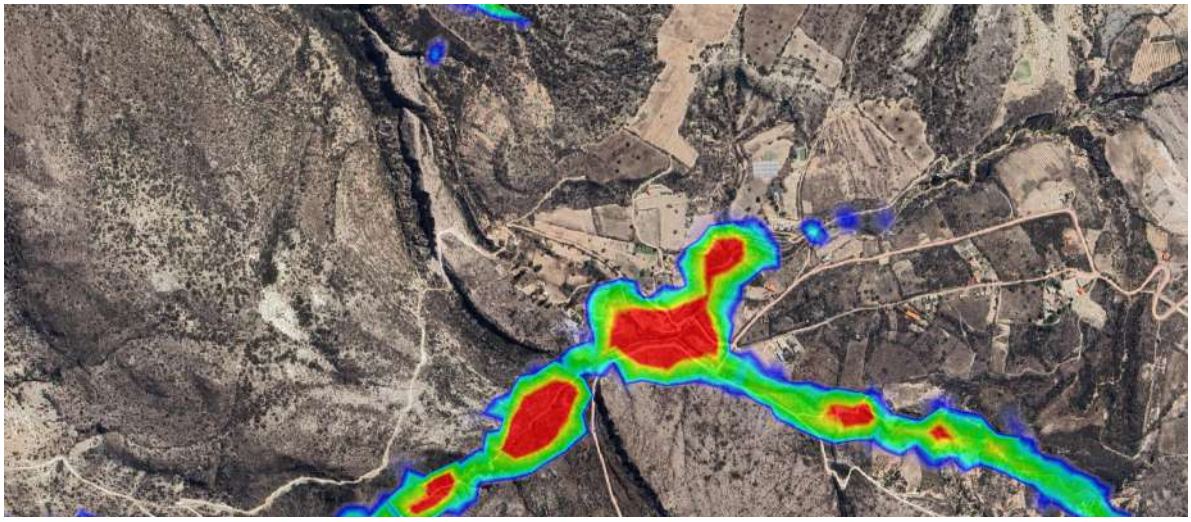
Nota. Elaboración propia a partir de la mancha de inundación de 500 años.

Figura 47
Zona agrícola con parcelas de cultivo sobre la margen inundable



Nota. Elaboración propia a partir de la mancha de inundación de 500 años.

Figura 48
Zona de la confluencia con el tributario



Nota. Elaboración propia a partir de la mancha de inundación de 500 años. La inundación en este sector está subestimada: El modelo no asigna un hidrograma propio al tributario (ver Limitaciones).

3.12.10.2 Distribución del peligro por márgenes.

Se analizó la distribución de la inundación entre las márgenes izquierda y derecha, restringiendo el cálculo al corredor del cauce (hasta 300 m del eje del río) para excluir la influencia del valle del tributario. El resultado, resumido en el Cuadro 26, muestra un comportamiento diferenciado según el sector: En el tramo del puente, la margen izquierda es la más afectada, con 64.53 ha inundadas frente a 54.31 ha de la derecha para el periodo de retorno de 500 años, y con un tirante medio también mayor; en el tramo de aguas abajo, en cambio, la margen derecha resulta la más comprometida, con 68.72 ha frente a 41.33 ha. Este patrón se mantiene de forma consistente en los periodos de retorno de 140 y 500 años, y es coherente con la ocupación del territorio: En el tramo del puente, las parcelas y viviendas se asientan sobre la margen izquierda, que es la más baja y donde el valle se abre, mientras que la margen derecha se encuentra confinada por los cerros.

Cuadro 26
Distribución de la inundación por márgenes en el corredor del cauce (Tr 500)

Sector	Margen	Área inundada (ha)	Tirante medio (m)
Del puente	Izquierda	64.53	1.82
Del puente	Derecha	54.31	1.67
De aguas abajo	Izquierda	41.33	1.62
De aguas abajo	Derecha	68.72	1.51

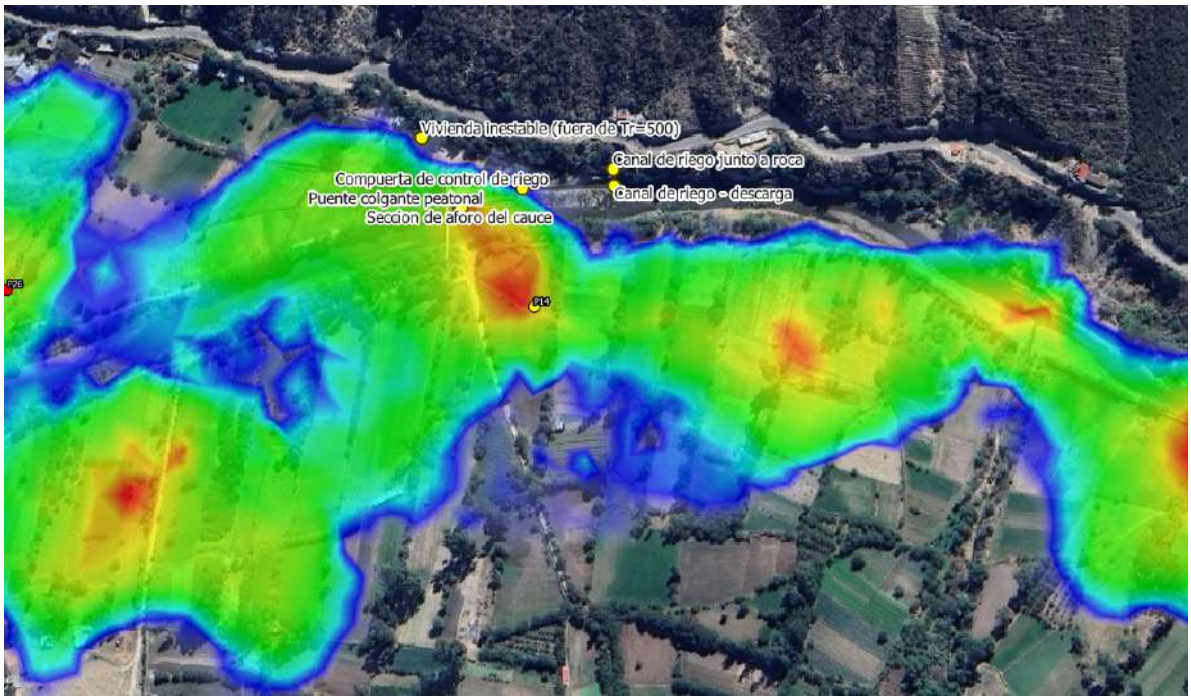
Nota. Elaboración propia. Corredor del cauce (distancia $\leq$300 m del eje) para el periodo de retorno de 500 años.

3.12.10.3 Elementos expuestos.

La verificación de campo permitió reconocer los elementos expuestos al peligro sobre la margen izquierda del tramo del puente: Viviendas, una compuerta de control de riego, un puente colgante peatonal, un canal de riego y la sección de aforo del cauce (Figura 49). Según la información oficial, en este tramo se encuentran expuestos 100 habitantes, 20 viviendas y 48.10 hectáreas de cultivos de maíz, alfalfa, hortalizas y frutales (Autoridad Nacional del Agua, 2025). La modelación reproduce la afectación de este sector agrícola: En la margen izquierda se inundan 38.94 hectáreas de cultivo para el periodo de retorno de 500 años, cifra coherente con la superficie oficial declarada.

Figura 49

Elementos expuestos en el sector del punto de control 21



Nota. Elaboración propia. Vivienda, compuerta de riego, puente colgante peatonal y sección de aforo sobre la mancha de inundación de 500 años.

3.12.10.4 Tramo de peligro aguas abajo del puente.

Inmediatamente aguas abajo del puente, el modelo identificó un tramo de aproximadamente 1.5 km con una intensidad de inundación comparable y en tirante medio superior a la de los sectores contiguos: 60.6 hectáreas inundadas por kilómetro y un tirante medio de 1.49 m para el periodo de retorno de 500 años, el mayor de los tres sectores analizados. Este resultado se retoma en las recomendaciones del apartado siguiente.

3.12.10.5 Limitación en la zona de confluencia.

Debe señalarse una limitación del modelo relevante para la interpretación del peligro en la zona de la confluencia. La modelación bidimensional considera un único ingreso de caudal en la frontera de aguas arriba, correspondiente al caudal de diseño de la cuenca completa. El tributario que confluye con el río en el sector de la confluencia no recibe un hidrograma propio; su lámina de agua responde únicamente al remanso del cauce principal. En consecuencia, la extensión de la inundación en ese ramal se encuentra subestimada, y los resultados en el entorno inmediato de la confluencia deben interpretarse considerando esta limitación.

3.12.11. Lineamientos técnicos y predimensionamiento de la defensa ribereña

A partir del peligro identificado y de la evidencia de campo, se formulan en este apartado los lineamientos técnicos orientados a la gestión del riesgo y a la protección ribereña del tramo, anclados en la declaración oficial de la Autoridad Nacional del Agua y sustentados en los resultados de la modelación numérica. El apartado presenta el marco oficial de la intervención, la concordancia entre las fuentes independientes disponibles, la cobertura de las defensas existentes, un predimensionamiento hidráulico preliminar de la defensa y las recomendaciones finales.

3.12.11.1 Marco oficial de la intervención.

La Autoridad Nacional del Agua declaró el tramo del río Pongora en el distrito de Jesús Nazareno como uno de los 40 puntos críticos de la región Ayacucho, con nivel de peligro **Alto** por inundación y erosión fluvial, y propuso como medida la limpieza, descolmatación y conformación de un muro de gaviones en la margen izquierda, con un presupuesto de S/ 18 110 087.81 para un tramo de 4.4 km (ficha FTR-0392); el conjunto de los puntos críticos de la región demanda una inversión de S/ 404 025 871.33 (Autoridad Nacional del Agua, 2025). No obstante, esta clasificación oficial se sustenta en la verificación técnica de campo y no en una modelación hidráulica: El informe no reporta tirantes, velocidades ni periodos de retorno. La propia entidad reconoce esta necesidad al señalar que “el emplazamiento de las obras requerirá del estudio del eje hidráulico del cauce, [...] determinando [...] las alturas de aguas máximas para el cual la defensa será diseñada” (Autoridad Nacional del Agua, 2025). La presente investigación aporta, precisamente, ese sustento hidráulico cuantitativo del que carece la ficha oficial.

3.12.11.2 Concordancia entre fuentes independientes.

El análisis de la distribución de la inundación por márgenes (apartado anterior) coincide con la delimitación oficial: El modelo confirma que en el tramo del puente la margen a proteger es la izquierda, y en el tramo de aguas abajo, la derecha, tal como establecen las fichas de la ANA. Esta concordancia se refuerza con un tercer estudio independiente: Castillo Cruz (2017b), mediante modelación hidráulica unidimensional y bidimensional con transporte de sedimentos, dimensionó una defensa de gaviones sobre la margen derecha del río Pongora en el sector de Pacaycasa, coincidente con la ficha FTR-0389. De este modo,

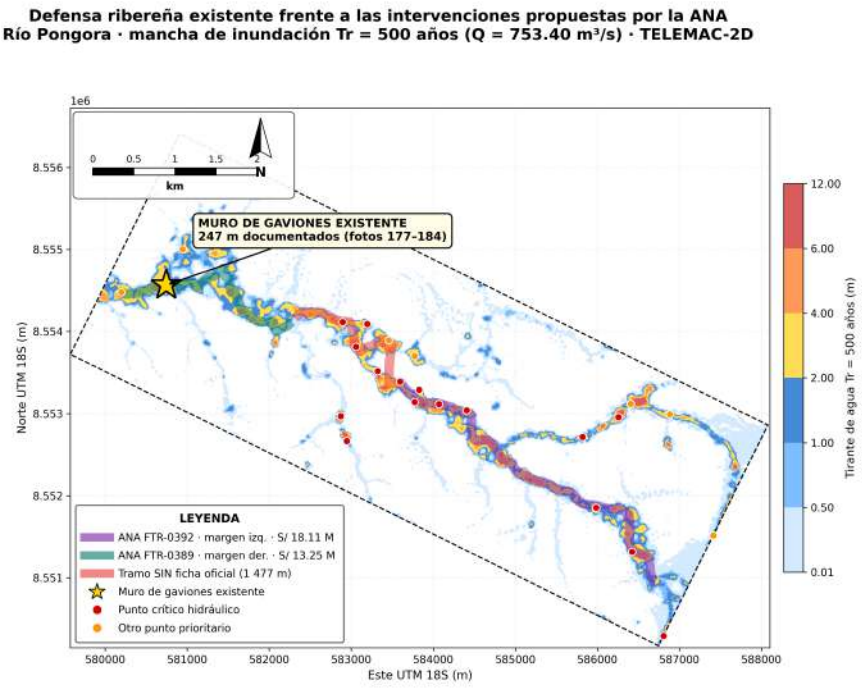
tres metodologías distintas —la modelación de Castillo Cruz (2017), la inspección de campo de la ANA (2025) y la modelación por elementos finitos de la presente tesis— convergen en la misma delimitación de las márgenes a proteger, lo que otorga una notable robustez al diagnóstico. La contribución de este trabajo se distingue por integrar los dos tramos oficiales en un dominio continuo, emplear seis periodos de retorno y una hidrología propia, y aportar el predimensionamiento de la defensa en el tramo del puente, que el estudio de riesgo de Felix Pahuara (2023a), realizado en ese mismo sector, no llegó a formular.

3.12.11.3 Cobertura de las defensas existentes.

La verificación de campo documentó la existencia de un muro de gaviones en el sector de aguas abajo (Pacaycasa, tramo FTR-0389, margen derecha), coincidente con el subtramo dimensionado por Castillo Cruz (2017), con una altura de muro del orden de 4.0 m. La extensión total de esta defensa existente no fue levantada en campo. En contraste, el tramo del puente proyectado (FTR-0392, margen izquierda) —el más poblado y con los mayores tirantes sobre la margen ocupada— carece de defensa. La Figura 50 contrasta la defensa existente con los tramos de intervención propuestos por la ANA y las zonas críticas del modelo, evidenciando que la protección actual cubre solo una fracción menor —del orden del 8 %— del tramo declarado crítico.

Figura 50

Defensa existente frente a las intervenciones propuestas por la ANA



Nota. Elaboración propia sobre la mancha de inundación de 500 años. Se indican los tramos oficiales FTR-0392 y FTR-0389, el tramo sin ficha y el muro de gaviones existente documentado.

3.12.11.4 Predimensionamiento hidráulico preliminar: Criterios.

Sobre la base de los resultados de la modelación se realizó un **predimensionamiento hidráulico preliminar** de la defensa ribereña en la margen izquierda del tramo del puente y su continuación aguas abajo. Debe precisarse que se trata de un dimensionamiento de carácter hidráulico y preliminar, que no constituye un diseño estructural definitivo: No incluye la verificación de estabilidad al vuelco y al deslizamiento, la capacidad portante del terreno ni el análisis geotécnico, los cuales corresponden a la ingeniería de detalle. Se adoptaron los siguientes criterios. Como caudal de diseño se empleó el correspondiente al periodo de retorno de 140 años (444.10 m^3/s), coincidente con el adoptado por el estudio oficial para el diseño hidráulico del puente, y el periodo de retorno de 500 años se reservó para la verificación de la socavación, de acuerdo con la práctica normativa (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011). La cimentación se consideró al nivel del thalweg, siguiendo el criterio de Castillo Cruz (2017); el borde libre se fijó como el mayor valor entre 0.30 m y el 10 % del tirante; y la altura del muro se redondeó al múltiplo de 0.50 m, correspondiente a la altura de la caja de gavión. La idoneidad de la solución se verificó con el criterio de Maccaferri, que recomienda gaviones para velocidades entre 0.80 y 6.40 m/s y alturas inferiores a 5.00 m.

Las progresivas se midieron a lo largo del **eje del cauce** , definido como la línea de menor cota de fondo extraída del modelo digital de elevación sección por sección, con origen (0+000) en la frontera de entrada del dominio de modelación. Este cadenamiento es propio del estudio y no coincide con el de otros trabajos ni con la nomenclatura de la ANA. Para el diseño definitivo, las progresivas deberán amarrarse a un levantamiento topográfico georreferenciado; en el presente predimensionamiento hidráulico, el cadenamiento sobre el thalweg del modelo digital constituye la referencia apropiada.

3.12.11.5 Predimensionamiento hidráulico preliminar: Resultados.

El tramo se segmentó en cinco subtramos de comportamiento hidráulico homogéneo, cuyos resultados se presentan en el Cuadro 27. Las alturas de muro resultantes varían entre 4.00 y 6.00 m; en el subtramo que contiene el puente proyectado, la altura predimensionada es de 4.50 m. El subtramo 4, situado inmediatamente aguas abajo del puente —en el tramo que ninguna ficha oficial cubre—, requiere una altura de 6.00 m que excede el límite del criterio de Maccaferri para gaviones, por lo que en ese subtramo correspondería una solución de enrocado o un gavión escalonado de diseño especial. Las secciones tipo de cada subtramo se presentan en la Figura 51, y el alineamiento en planta de la defensa propuesta, en la Figura 52.

Cuadro 27

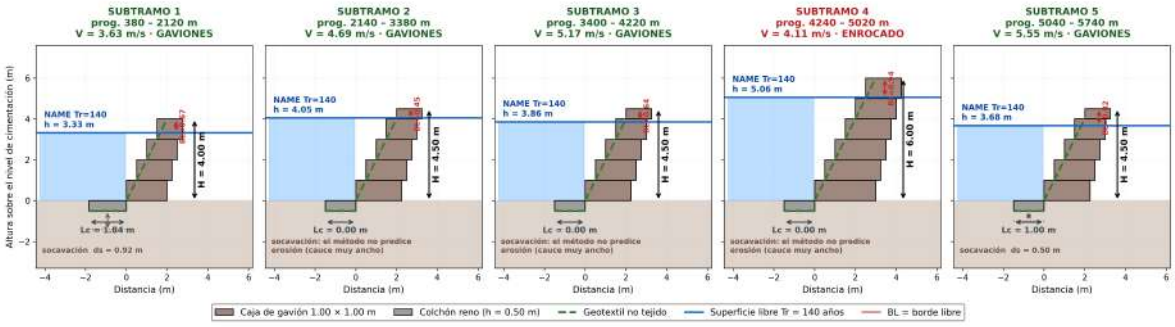
Predimensionamiento hidráulico preliminar de la defensa por subtramo

Subtramo	Progresiva (m)	Tirante (m)	Vel. (m/s)	Altura muro	Solución
1	380 – 2 120	3.33	3.63	4.00 m	Gaviones
2	2 140 – 3 380	4.05	4.69	4.50 m	Gaviones
3	3 400 – 4 220	3.86	5.17	4.50 m	Gaviones
4	4 240 – 5 020	5.06	4.11	6.00 m	Enrocado
5	5 040 – 5 740	3.68	5.55	4.50 m	Gaviones

Nota. Elaboración propia. Tirante y velocidad para el periodo de retorno de 140 años. El subtramo 3 contiene el puente proyectado. Longitud total 5.28 km; volumen indicativo $\approx$7 990 m^3.

Figura 51

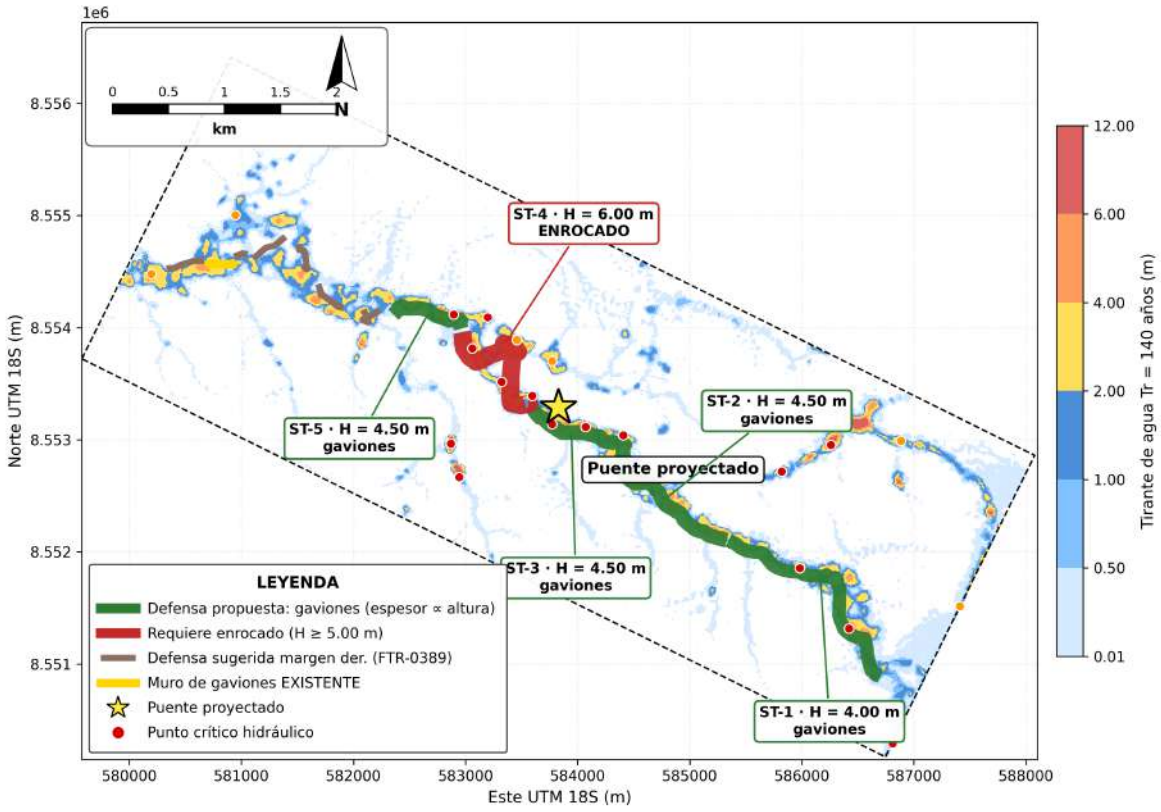
Secciones tipo de la defensa de gaviones por subtramo



Nota. Elaboración propia. Predimensionamiento hidráulico preliminar; no constituye diseño estructural definitivo.

Figura 52

Alineamiento en planta de la defensa ribereña propuesta



Nota. Elaboración propia sobre la mancha de inundación de 140 años. En verde, los tramos con gaviones; en rojo, el subtramo que requiere enrocado; en marrón, la defensa sugerida para completar la margen derecha del tramo de aguas abajo. La estrella indica el puente y el símbolo amarillo, el muro de gaviones existente.

Respecto a la socavación, el cálculo por el método de Lischtvan-Levediev arrojó valores nulos en los subtramos de cauce más ancho, resultado atribuible a una limitación propia del método —que supone un cauce definido— frente a la gran amplitud del cauce en esos sectores. Por ello, para la profundidad de cimentación en el entorno del puente se recomienda adoptar como valor de gobierno la socavación determinada por el estudio hidrológico oficial en la sección constreñida del puente (5.72 m), de la que resulta una longitud de colchón reno del orden de 11.4 m para un factor de seguridad de 2.0.

3.12.11.6 Lineamientos y recomendaciones.

De los resultados anteriores se desprenden los siguientes lineamientos técnicos para la gestión del riesgo en el tramo del río Pongora. En primer lugar, se recomienda priorizar la protección del tramo del puente (FTR-0392, margen izquierda), que concentra la población, las viviendas y las 48.10 ha de cultivos expuestas, y que actualmente carece de defensa; el predimensionamiento indica muros de gaviones de 4.0 a 4.5 m de altura para este tramo. En segundo lugar, se destaca la necesidad de atender el subtramo inmediatamente aguas abajo del puente, no cubierto por ninguna ficha oficial, que presenta el mayor tirante medio del tramo y que, por su altura de aguas, requeriría una solución de enrocado. En tercer lugar, en el tramo de aguas abajo (FTR-0389, margen derecha), donde la defensa existente cubre apenas una fracción del tramo declarado, el modelo permite sugerir la prolongación de la protección en los sectores no cubiertos, aguas arriba y aguas abajo del muro existente, con alturas del orden de 4.0 a 5.0 m. En cuarto lugar, y en concordancia con la recomendación de la propia ANA de mantener un alineamiento parejo de las riberas para evitar que “la corriente cruce bruscamente y afecte la ribera opuesta” (Autoridad Nacional del Agua, 2025), el diseño de detalle deberá considerar la carga hidráulica sobre ambas márgenes. Finalmente, la medida estructural debe complementarse con la descolmatación del cauce, que la propia ANA propone, para mantener la sección hidráulica. Se reitera que estos lineamientos constituyen un predimensionamiento hidráulico preliminar; el diseño definitivo requerirá un levantamiento topográfico de secciones transversales, un estudio geotécnico y la verificación estructural de la defensa.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis de resultados

En este apartado se interpretan los resultados obtenidos. No se trata de repetir las cifras ya presentadas, sino de explicar qué significan, por qué salieron así y qué consecuencias tienen para el tramo de estudio. Para apoyar la explicación, cada tema se acompaña de un cuadro de síntesis que reúne los valores clave. El análisis se ordena por temas: Primero la validación de la base morfométrica, luego los caudales de diseño, después el comportamiento del flujo, la distribución del peligro entre las márgenes, la coincidencia con las intervenciones oficiales y, por último, la propuesta de defensa. Cada tema se cierra señalando sus alcances y sus límites.

4.1.1. Sobre la validación de la caracterización de la cuenca

El análisis morfométrico propio y el estudio oficial de la DRTCA coincidieron de forma estrecha. El Cuadro 28 resume los parámetros principales de ambos cálculos y su diferencia. La mayoría se aparta menos del 3 %, y el área de la cuenca el parámetro de mayor peso difiere en apenas 0.19 %. Este resultado no es un dato aislado, sino la condición que permite confiar en todo lo que viene después.

Cuadro 28
Contraste de los parámetros morfométricos: Cálculo propio y estudio oficial DRTCA

Parámetro	Propio	DRTCA	Diferencia
Área de la cuenca (km^2)	1 129.77	1 127.68	+0.19 %
Perímetro (km)	230.58	231.60	−0.44 %
Longitud del cauce principal (km)	70.58	68.69	+2.75 %
Coeficiente de compacidad (K_c)	1.921	1.94	−0.98 %
Altitud media (msnm)	3 520.2	3 522.7	−0.07 %
Pendiente del cauce (m/m)	0.0282	0.03	−6.0 %
Tiempo de concentración (h)	15.01	14.63	+2.60 %

Nota. Elaboración propia. El tiempo de concentración corresponde a la fórmula de Témez.

La razón por la que esta coincidencia importa es sencilla. La modelación hidráulica se apoya en una cadena de pasos encadenados: La delimitación de la cuenca alimenta el cálculo de los caudales, y los caudales alimentan la simulación del flujo. Si el primer eslabón estuviera mal, el error se arrastraría hasta el final. Que dos delimitaciones hechas por separado una propia y una oficial entreguen prácticamente la misma área indica que la cuenca quedó bien definida y que el punto de partida es sólido. Por eso la caracterización morfométrica se toma aquí no como un fin, sino como el respaldo que da validez a la modelación posterior.

4.1.2. Sobre los caudales de diseño

El análisis hidrológico entregó los caudales para cada periodo de retorno, resumidos en el Cuadro 29. Van desde 192.74 m^3/s para 25 años hasta 753.40 m^3/s para 500 años. Estos valores se obtuvieron con una hidrología propia, a partir de los registros de precipitación de las estaciones del entorno de la cuenca, y constituyen el dato de entrada de la modelación hidráulica.

Cuadro 29
Caudales de diseño adoptados para la modelación hidráulica

Periodo de retorno (años)	25	50	100	140	200
Caudal (m^3/s)	192.74	267.28	360.91	444.10	476.64

Nota. Elaboración propia. El evento de 500 años corresponde a un caudal de 753.40 m^3/s. Los eventos de 140 y 500 años adoptan el caudal oficial de la DRTCA.

La decisión de trabajar con una hidrología propia, y no solo con la del estudio oficial, tiene una consecuencia metodológica. Los caudales son la variable que gobierna todo el resultado hidráulico: Un caudal mayor produce mayor tirante, mayor velocidad y mayor extensión de inundación. Al calcularlos de forma independiente y contrastarlos con el estudio oficial, se evita que un solo criterio condicione el desenlace de la modelación. El conjunto de periodos de retorno adoptado cubre desde eventos frecuentes hasta eventos extremos, de modo que el análisis no queda atado a un único escenario, sino que muestra cómo responde el río en todo el rango de crecidas posibles.

4.1.3. Sobre el comportamiento del flujo y la forma del valle

La modelación con TELEMAC-2D mostró cómo se comporta el río durante las crecidas. El flujo resultó en su mayor parte subcrítico, es decir, un flujo tranquilo y controlado por las condiciones de aguas abajo, y solo se volvió rápido (supercrítico) en tramos puntuales de mayor pendiente. Este patrón es el esperable en un cauce de montaña con pendientes moderadas, y confirma que la modelación reproduce un comportamiento físicamente coherente.

El hallazgo más relevante aparece al comparar el evento más pequeño con el más grande, como se muestra en el Cuadro 30. Entre el evento de 25 años y el de 500 años el caudal creció un 291 %, casi se cuadruplicó; sin embargo, el área inundada solo aumentó un 24 % y el tirante representativo, un 10 %. Es decir, casi cuatro veces más agua no produjo casi ningún ensanchamiento de la mancha ni una subida proporcional del nivel máximo.

Cuadro 30
Respuesta del tramo al aumento del caudal: Comparación entre el evento de 25 y el de 500 años

Variable	Evento 25 años	Evento 500 años	Variación
Caudal de diseño (m^3/s)	192.74	753.40	+291 %
Área inundada, $h \geq 0.10$ m (ha)	296.77	368.00	+24 %
Tirante representativo (m, percentil 99.9)	8.75	9.66	+10 %
Velocidad máxima (m/s)	6.03	7.27	+21 %

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de TELEMAC-2D. El tirante representativo corresponde al percentil 99.9 del campo.

La explicación está en la forma del valle. El cauce del Pongora corre encañonado entre laderas, y esa geometría impide que el agua se extienda hacia los costados. El caudal adicional no tiene adónde ir, de modo que, en lugar de ensanchar la mancha, se concentra dentro del cauce: La zona con tirante mayor a un metro crece un 56 % entre ambos eventos, mucho más que el área total, y las velocidades aumentan. En otras palabras, cuando llega más agua, el río no se extiende hacia los lados, sino que se hace más profundo y más rápido en su parte central.

Esta observación cambia la forma de entender el peligro en el tramo. En un valle abierto, una crecida grande se reconoce porque el agua ocupa una franja ancha, y el riesgo se lee sobre el mapa. En el Pongora ocurre lo contrario: La mancha de inundación cambia poco de un periodo de retorno a otro, de modo que mirar solo su extensión puede llevar a subestimar el peligro. Lo que crece es la profundidad y la fuerza del agua en el cauce. Por eso, en este tramo, el parámetro que mejor describe la peligrosidad no es cuánto se ensancha el río, sino cuánta profundidad y velocidad alcanza en su cauce. Esta distinción es la que orienta después el dimensionamiento de las defensas, que deben responder a la altura y a la fuerza del agua antes que a su avance lateral.

4.1.4. Sobre la distribución del peligro entre las márgenes

El análisis por márgenes mostró un comportamiento que cambia según el sector, tal como recoge el Cuadro 26 presentado en el apartado anterior. En el tramo del puente, la margen izquierda es la más afectada, con 64.53 ha inundadas frente a 54.31 ha de la derecha para el periodo de retorno de 500 años. En el tramo de aguas abajo la situación se invierte, y es la margen derecha la más comprometida, con 68.72 ha frente a 41.33 ha. Este resultado se obtuvo restringiendo el cálculo al corredor del cauce —hasta 300 m del eje del río— para dejar fuera la influencia del valle del tributario, que de otro modo distorsionaba la comparación.

4.1.4.1 Consistencia espacial de la mancha de inundación.

El dominio modelado se extiende a lo largo de 8 000 m sobre el eje del río, verificados mediante 399 secciones transversales del thalweg cada 20 m, desde la frontera de entrada hasta la salida. Sobre esa longitud, el área inundada con el umbral $h \geq 0{,}10$ m (296.77 ha en Tr = 25 años a 368.00 ha en Tr = 500 años) corresponde a un ancho promedio de la mancha de entre 371 y 460 m a lo largo de todo el tramo modelado, creciendo de forma monótona con el periodo de retorno. El análisis por secciones transversales continuas no identificó tramos del dominio en los que la mancha de inundación se interrumpiera o quedara desconectada del cauce principal; la variación que sí se observa es de ancho entre secciones —más angosta en los sectores confinados por laderas, más ancha donde el valle se abre—, consistente con el control geomorfológico del confinamiento descrito en el análisis hidrológico. Esta verificación de continuidad espacial complementa, sin reemplazar, la revisión visual de los mapas de inundación presentados en los Anexos.

La interpretación de este patrón se apoya en la forma del terreno y en cómo la gente ocupa el territorio. En el tramo del puente, la margen izquierda es la más baja y es donde el valle se abre, de modo que el agua encuentra allí espacio para desbordar; sobre esa misma margen se asientan las parcelas de cultivo y las viviendas. La margen derecha, en cambio, está confinada por los cerros, que actúan como un muro natural y limitan la inundación. Es decir, el lado donde el modelo indica mayor peligro coincide con el lado donde hay población y actividad agrícola expuesta, lo que agrava las consecuencias de la crecida.

Conviene precisar el sentido de este resultado. El modelo no decide dónde vive la gente ni dónde están los cultivos; solo calcula por dónde va el agua a partir del terreno. Que ese cálculo, hecho sobre la topografía, apunte justamente a la margen ocupada, es lo que convierte un dato hidráulico en un dato de riesgo. La coincidencia entre lo que dice el modelo y lo que se observa en campo —que la gente cultiva y habita la margen izquierda— es, por tanto, una primera señal de que la modelación está representando bien la realidad del tramo.

4.1.5. Sobre la coincidencia con las intervenciones oficiales y la verificación de campo

Uno de los resultados de mayor peso es que la modelación coincide con lo que ya habían señalado las autoridades. El Cuadro 31 contrasta lo que entrega el modelo con lo que declara la ficha oficial de la Autoridad Nacional del Agua. En ambos casos la margen más afectada es la misma la izquierda en el tramo del puente y la derecha en el tramo de aguas abajo y las áreas de cultivo afectadas son del mismo orden de magnitud.

Cuadro 31
Contraste entre la modelación de este trabajo y la ficha oficial de la ANA

Aspecto	Modelación (este trabajo)	Ficha oficial ANA
Margen más afectada (tramo del puente)	Izquierda	Izquierda
Margen más afectada (aguas abajo)	Derecha	Derecha
Área de cultivo afectada (ha)	38.94	48.10

Nota. Elaboración propia y Autoridad Nacional del Agua (2025). El área de la modelación corresponde a la margen izquierda del tramo para el periodo de retorno de 500 años.

El valor de esta coincidencia está justamente en que los métodos son independientes. La ANA llega a su diagnóstico recorriendo el terreno y observando los daños; este trabajo llega al suyo resolviendo las ecuaciones del flujo sobre una malla de elementos finitos. A ello se suma un estudio previo realizado en la misma zona, que apunta en el mismo sentido, de modo que tres fuentes distintas concuerdan por caminos diferentes. Que procedimientos tan distintos apunten al mismo lugar reduce la posibilidad de que el resultado sea producto del azar o de un error de un solo método. En la literatura sobre modelación de inundaciones, esta forma de contrastar un modelo con evidencia obtenida por otra vía se considera una de las maneras más sólidas de respaldar sus resultados, sobre todo cuando no se dispone de mediciones directas de una crecida real.

El contraste del área de cultivo, incluido en el cuadro, aporta una verificación adicional de tipo numérico. El modelo estima 38.94 ha inundadas en la margen izquierda para el periodo de retorno de 500 años, frente a las 48.10 ha que declara la ficha oficial; reproduce así el 81 % de la superficie declarada. La diferencia es razonable y tiene una explicación clara: La ficha contabiliza la parcela completa afectada, mientras que el modelo solo cuenta la fracción que queda bajo el agua. Que dos formas independientes de medir una en campo y otra por computadora entreguen valores tan próximos da confianza en que la modelación no está exagerando ni subestimando la magnitud del problema.

4.1.6. Sobre la propuesta de defensa

Con los tirantes obtenidos del modelo se predimensionaron las medidas de protección para el tramo del puente, con muros de gaviones de entre 4.0 y 6.0 m de altura según el subtramo. La altura no se fijó por criterio general, sino a partir del tirante que el propio modelo calcula en cada sector, de modo que la defensa responde a la crecida que se espera en ese punto y no a un valor promedio.

El análisis reveló, además, un sector especialmente exigente. Inmediatamente aguas abajo del puente un sector que ninguna ficha oficial cubre el modelo identificó tirantes altos y una intensidad de inundación comparable a la de los sectores vecinos, de manera que requeriría una solución de mayor capacidad, del tipo enrocado. Este hallazgo es importante porque señala un vacío: Un tramo con peligro real que hasta ahora no había sido considerado en las intervenciones planificadas.

Aquí se ve con claridad el aporte del trabajo. La ficha oficial declara el peligro y propone intervenir, pero no dice cuánto ni con qué dimensiones, y la propia ANA reconoce que hace falta un estudio técnico que lo sustente. La modelación entrega justamente ese sustento: La altura y la ubicación que debe tener la defensa. De este modo, el trabajo no se limita a confirmar un peligro ya declarado por el Estado, sino que le agrega la base hidráulica necesaria para pasar del diagnóstico al diseño de la solución.

4.1.7. Sobre los alcances y las limitaciones

Los resultados deben leerse reconociendo sus límites, tanto para no sobreinterpretarlos como para orientar trabajos futuros.

La primera limitación está en la zona de la confluencia con el tributario. La modelación considera un único ingreso de caudal en la frontera de aguas arriba, correspondiente a la cuenca completa, y el tributario no recibe un hidrograma propio. Por eso la lámina de agua en ese ramal responde solo al remanso del cauce principal, y la inundación en el entorno de la confluencia queda subestimada. Los resultados en ese sector deben interpretarse con esa reserva.

La segunda limitación es el alcance de la verificación de campo. De los 23 puntos prioritarios, se verificaron directamente 3 en la primera visita, concentrados en el sector del puente. La coincidencia observada en esos puntos y la validación cruzada del área de cultivo respaldan la confiabilidad del modelo, pero una comprobación de la totalidad de los puntos —idealmente tras una crecida real, con registro de las huellas del agua— reforzaría aún más los resultados y queda como recomendación para estudios posteriores.

4.2. Contrastación de hipótesis

4.2.1. Contrastación de hipótesis específica 01

- Las características morfométricas de la cuenca del río Pongora influyen directamente en su dinámica hidrológica y comportamiento hidráulico.

Para contrastar esta hipótesis se siguió la cadena metodológica que une la forma de la cuenca con su respuesta. Primero se cuantificaron los parámetros morfométricos de la cuenca del río Pongora y se clasificaron según los rangos del Manual de Hidrología del MTC. Luego se examinó de qué manera esos parámetros condicionan la generación de los caudales de diseño y, finalmente, cómo se reflejan en el comportamiento del flujo que entregó la modelación con TELEMAC-2D. La hipótesis se considera verificada si los rasgos morfométricos observados explican, de forma coherente, tanto la respuesta hidrológica como el comportamiento hidráulico del tramo.

El primer nivel de evidencia es la caracterización morfométrica misma. El Cuadro 32 reúne los parámetros de forma, relieve y red de drenaje, su valor, su clasificación y el efecto que cada uno tiene sobre la dinámica de la cuenca. Todos ellos se obtuvieron con procedimientos propios en un entorno SIG y coincidieron de forma estrecha con el estudio oficial de la DRTCA, lo que da confianza en los valores empleados.

Cuadro 32
Parámetros morfométricos de la cuenca del río Pongora y su influencia en la dinámica hidrológica e hidráulica

Parámetro	Valor	Clasificación	Influencia en la dinámica
Coeficiente de compacidad (K_c)	1.921	Rectangular-oblonga (cuenca muy alargada)	Los aportes de los afluentes llegan desfasados; el pico de crecida se atenúa y hay menor riesgo de crecida súbita
Factor de forma (K_f)	0.227	Bajo (forma alargada)	Confirma la forma alargada; la escorrentía no se concentra de golpe
Orden de la red (Strahler)	6	Red de drenaje desarrollada	Sistema de evacuación jerarquizado, propio de una cuenca grande
Densidad de drenaje	1.64 km/km^2	Baja a moderada	Drenaje moderado; respuesta no torrencial
Tiempo de concentración (Témez)	15.01 h	Elevado	Tiempo de respuesta largo; refuerza la atenuación del pico
Pendiente media del cauce	2.82 %	Moderada a fuerte (cauce de montaña)	Flujo veloz; régimen mixto subcrítico-supercrítico y potencial erosivo en el cauce
Altitud media	3 520 msnm	Cuenca altoandina	Régimen pluvial estacional de montaña

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento SIG del modelo digital de elevación, contrastado con el estudio oficial de la DRTCA (2022).

El segundo nivel de evidencia es cómo estos parámetros se traducen en la respuesta hidrológica. La cuenca del Pongora es grande (1 129.77 km^2) pero alargada, con un coeficiente

de compacidad de 1.921 y un factor de forma bajo. Esta forma tiene una consecuencia directa sobre el hidrograma: En una cuenca alargada, los aportes de los distintos afluentes no llegan al mismo tiempo a la salida, sino desfasados, de modo que el caudal máximo se reparte en el tiempo y no se concentra en un solo pico agudo. El tiempo de concentración elevado (15.01 h) apunta en el mismo sentido. Este comportamiento se reconoce en la literatura como propio de las cuencas alargadas, menos expuestas a crecidas repentinas que las cuencas compactas (Del Águila & Mejía, 2021). Los caudales de diseño obtenidos de 192.74 m^3/s para 25 años a 753.40 m^3/s para 500 años son, por tanto, coherentes con una cuenca de este tamaño y de esta forma: Importantes en magnitud, pero producto de una respuesta atenuada y no torrencial.

El tercer nivel de evidencia es cómo el relieve condiciona el comportamiento hidráulico. La pendiente del cauce (2.82 %) es la propia de un río de montaña, y la modelación confirmó su efecto: El flujo alcanza velocidades altas en el cauce —hasta 7.27 m/s en el evento de 500 años— y presenta un régimen mixto, subcrítico en la mayor parte del tramo con transiciones locales a supercrítico en los sectores de mayor pendiente. Además, el encañonamiento del valle, ligado a este mismo relieve, hace que el agua se concentre en profundidad dentro del cauce en lugar de extenderse hacia los lados, tal como mostró el análisis de resultados. Esta relación entre la forma del terreno y el comportamiento del flujo es la que sostiene, en distintos estudios, el uso de los parámetros morfométricos como indicadores de la susceptibilidad a la inundación de una cuenca (Ismail et al., 2022; Torrefranca & Otadoy, 2024).

4.2.1.1 Contrastación.

La hipótesis específica 01 se **acepta** en los siguientes términos. Los parámetros morfométricos de la cuenca del río Pongora son consistentes, de forma coherente, con su dinámica hidrológica y su comportamiento hidráulico. Por un lado, la forma alargada —coeficiente de compacidad de 1.921, factor de forma de 0.227— y el tiempo de concentración elevado son coherentes con una respuesta hidrológica atenuada, en la que los caudales de diseño, aunque grandes en magnitud, resultan consistentes con el tamaño y la forma de la cuenca y no de una respuesta torrencial. Por otro lado, la pendiente del cauce y el encañonamiento del valle son consistentes con el comportamiento hidráulico observado: Un flujo veloz, de régimen mixto, que gana profundidad en el cauce en lugar de extenderse. La influencia de la morfometría sobre la dinámica del río es, por tanto, coherente y observable a partir de los resultados de la modelación. Los resultados obtenidos son consistentes con la hipótesis específica 01 planteada; no se realizó, sin embargo, una prueba estadística formal de causalidad, dado que esta contrastación se apoya en una relación coherente entre parámetros y resultados y la investigación es de tipo no experimental.

4.2.2. Contrastación de hipótesis específica 02

- La modelación numérica con elementos finitos permite representar de forma coherente y consistente el régimen de caudales y el flujo en el río Pongora bajo distintos escenarios de caudales.

Para contrastar esta hipótesis se evaluó si la modelación con elementos finitos representó el flujo del río con detalle y de forma consistente en todos los escenarios de caudal. Se revisaron dos aspectos: La respuesta del modelo ante los seis periodos de retorno y el tipo de información que entrega el método bidimensional frente a un enfoque más simple. El Cuadro 33 resume la respuesta del modelo en los seis escenarios simulados.

Cuadro 33

Respuesta de la modelación con elementos finitos en los seis escenarios de caudal

Tr (años)	Caudal (m^3/s)	Tirante repr. (m)	Área inund. (ha)	Velocidad máx. (m/s)
25	192.74	8.75	296.77	6.03
50	267.28	8.91	311.78	6.03
100	360.91	9.19	328.08	6.03
140	444.10	9.37	339.81	6.16
200	476.64	9.39	342.98	6.22
500	753.40	9.66	368.00	7.27

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de TELEMAC-2D. Tirante representativo = percentil 99.9 del campo.

En primer lugar, el modelo respondió de forma ordenada y coherente: A mayor caudal, mayor tirante, mayor área inundada y mayor velocidad, sin saltos ni contradicciones entre escenarios. Esto indica que la representación del régimen de caudales es consistente en todo el rango, desde el evento frecuente de 25 años hasta el extremo de 500 años. Además, el flujo se mantuvo en un régimen predominantemente subcrítico —con una mediana del número de Froude entre 0.15 y 0.26— y con transiciones locales a supercrítico en los tramos de mayor pendiente, un comportamiento físicamente razonable en todos los casos.

En segundo lugar, el método de elementos finitos entregó información que un modelo unidimensional no puede dar: Los campos de tirante, velocidad y número de Froude distribuidos en el espacio, calculados en los 30 348 nodos del dominio. Gracias a ello se pudo distinguir por qué margen se concentra la inundación, en qué puntos el flujo pasa de tranquilo a rápido y cómo se comporta el agua alrededor del puente. La malla no estructurada, más fina en el cauce (aristas del orden de 25 m) y más gruesa en la llanura (50 m), permitió afinar el cálculo justamente donde el flujo es más complejo.

4.2.2.1 Contrastación.

La hipótesis específica 02 se **acepta**.

4.2.3. Contrastación de hipótesis específica 03

- La modelación numérica con elementos finitos constituye una herramienta válida para simular el flujo en el río Pongora.

Para contrastar esta hipótesis se sometió el modelo a un conjunto de comprobaciones. Unas son internas y revisan la coherencia física del propio cálculo; otras son externas y lo comparan con evidencia obtenida de forma independiente. Un modelo se considera una herramienta válida cuando supera ambas. El Cuadro 34 reúne esas comprobaciones.

Cuadro 34
Comprobaciones internas y externas que respaldan la validez del modelo

Comprobación	Modelo	Referencia independiente	Resultado
Área de cultivo inundada (ha)	38.94	48.10 (ficha ANA)	81 %
Margen más afectada (tramo del puente)	Izquierda	Izquierda (ficha ANA)	Coincide
Margen más afectada (aguas abajo)	Derecha	Derecha (ficha ANA)	Coincide
Pendiente del thalweg (m/m)	0.00779	0.0073 (cond. de borde)	Dif. 6.7 %
Cota de fondo en la salida (msnm)	2 447.20	2 447.11 (cond. de borde)	Dif. 9 cm
Balance de masa (Tr 200)	476.64 entra / 477.0 sale	Conservación	Dif. <0.1 %

Nota. Elaboración propia. Comprobaciones externas contra Autoridad Nacional del Agua (2025) e internas contra las condiciones de contorno del modelo.

Las comprobaciones internas muestran que el cálculo es físicamente consistente: El agua que entra al dominio es prácticamente la misma que sale (diferencia menor al 0.1 %), la pendiente de la superficie del agua coincide con la del terreno empleada en la condición de borde y la cota de fondo en la salida reproduce la impuesta con apenas 9 cm de diferencia. A esto se añade que la malla presentó buena calidad geométrica, con un ángulo mínimo medio de 45° y sin elementos degenerados, lo que garantiza que la discretización no introduce errores numéricos relevantes. Las comprobaciones externas son aún más importantes, porque comparan el modelo con la realidad: El área de cultivo inundada coincide en un 81 % con la declarada por la Autoridad Nacional del Agua, y la margen más afectada coincide con las fichas oficiales en los dos tramos. A ello se suma la coincidencia con lo observado en la verificación de campo y con un estudio previo realizado en un área contigua (Castillo Cruz, 2017b).

4.2.3.1 Contrastación.

La hipótesis específica 03 se **acepta**. El modelo superó tanto las comprobaciones internas de consistencia física como las externas de contraste con evidencia independiente, de modo que constituye una herramienta válida para simular el flujo del río Pongora en el tramo de estudio.

4.2.4. Contrastación de hipótesis específica 04

- Las características morfométricas de la cuenca del río Pongora guardan correspondencia con los resultados de la modelación numérica, de modo que la caracterización física de la cuenca es consistente con el comportamiento hidráulico simulado, sin que ello implique una relación causal demostrada estadísticamente.

Esta hipótesis afirma que la caracterización física de la cuenca explica el comportamiento hidráulico simulado. Para contrastarla se puso lado a lado cada rasgo físico del terreno con el comportamiento del flujo que el modelo entregó en ese mismo sector, con el fin de ver si uno explica al otro. El Cuadro 35 presenta esa correspondencia.

Cuadro 35
Correspondencia entre los rasgos físicos de la cuenca y el comportamiento hidráulico simulado

Rasgo físico de la cuenca o el terreno	Comportamiento hidráulico simulado
Valle encañonado, con fuerte confinamiento lateral	El área inundada crece poco (+24 %); el agua gana profundidad en lugar de extenderse
Pendiente del cauce de 2.82 % (cauce de montaña)	Velocidades altas en el cauce (hasta 7.27 m/s) y régimen mixto subcrítico-supercrítico
Margen derecha confinada por los cerros	Menor inundación de la margen derecha en el tramo del puente
Margen izquierda más baja y donde el valle se abre	Mayor inundación y concentración del peligro en la margen izquierda
Descenso del thalweg según el perfil del terreno	La superficie del agua sigue el thalweg; pendiente simulada (0.00779) ≈ terreno (0.0073)

Nota. Elaboración propia a partir del modelo digital de elevación y de los resultados de TELEMAC-2D.

La lectura del cuadro muestra una correspondencia clara. El confinamiento del valle explica que el agua gane profundidad en vez de extenderse; la pendiente fuerte del cauce explica las velocidades altas y el régimen mixto; los cerros de la margen derecha explican por qué esa margen se inunda menos en el tramo del puente, y la margen izquierda, más baja y abierta, explica que allí se concentre el peligro. Incluso el perfil del terreno a lo largo del thalweg se corresponde con la superficie del agua simulada. Esta correspondencia entre la forma física de la cuenca y el comportamiento del flujo es la base sobre la que distintos estudios emplean los parámetros morfométricos para anticipar el comportamiento hidráulico y la susceptibilidad a la inundación de una cuenca (Del Águila & Mejía, 2021; Ismail et al., 2022; Torrefranca & Otadoy, 2024).

4.2.4.1 Contrastación.

La hipótesis específica 04 se **acepta**. Existe una correspondencia directa y verificable entre los rasgos físicos de la cuenca y los resultados de la modelación: La caracterización física del tramo —confinamiento, pendiente y disposición de las márgenes— explica, sector por sector, el comportamiento hidráulico simulado.

4.2.5. Contrastación de hipótesis específica 05

- Los resultados de la evaluación hidráulica permiten plantear lineamientos técnicos útiles para la gestión del recurso hídrico y la prevención de riesgos.

Para contrastar esta hipótesis se verificó si los resultados hidráulicos sirvieron efectivamente para plantear medidas técnicas concretas de protección y gestión. La prueba de que los resultados son útiles es que, a partir de ellos, se pudo predimensionar una defensa con ubicaciones, alturas y tipo de solución definidos. El Cuadro 36 presenta ese predimensionamiento por subtramos, derivado de los tirantes y velocidades del modelo.

Cuadro 36

Predimensionamiento de la defensa por subtramos, derivado de los resultados hidráulicos

Subtramo	Progresiva (m)	Tirante Tr140 (m)	Velocidad máx. (m/s)	Altura de muro (m)	Solución
1	380–2 120	3.33	3.63	4.00	Gaviones
2	2 140–3 380	4.05	4.69	4.50	Gaviones
3 (puente)	3 400–4 220	3.86	5.17	4.50	Gaviones
4 (vacío)	4 240–5 020	5.06	4.11	6.00	Enrocado
5 (vacío)	5 040–5 740	3.68	5.55	4.50	Gaviones

Nota. Elaboración propia. Caudal de diseño de 140 años (444.10 m^3/s); el sector “vacío” es el que ninguna ficha oficial cubre.

A partir de los tirantes del evento de diseño de 140 años se definieron cinco subtramos de protección en la margen izquierda, con muros de gaviones de entre 4.00 y 6.00 m de altura. El subtramo 4, situado justo aguas abajo del puente, resultó el más exigente y requeriría una solución de enrocado en lugar de gaviones. Ese mismo subtramo cae en el sector que ninguna ficha oficial cubre, de modo que la evaluación hidráulica no solo permitió dimensionar la defensa, sino que además detectó un tramo de peligro que no había sido considerado. Para el pie de la defensa en el entorno del puente se adoptó la socavación del estudio oficial (5.72 m), que conduce a una longitud de cimentación del orden de 11.44 m. Todo ello constituye un aporte técnico directo para la prevención de riesgos, que la propia Autoridad Nacional del Agua reconoce como necesario (Autoridad Nacional del Agua, 2025), y se apoya en el precedente de intervenciones con gaviones ejecutadas en un área contigua (Castillo Cruz, 2017b).

Debe precisarse el alcance de este resultado. Se trata de un predimensionamiento hidráulico preliminar orientado a fijar ubicación, altura y tipo de defensay no de un diseño estructural definitivo. El diseño final requerirá un levantamiento topográfico de las secciones y la verificación geotécnica de la estabilidad, que quedan fuera del alcance de esta investigación.

4.2.5.1 Contrastación.

La hipótesis específica 05 se **acepta**.

5. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones de la investigación

5.1.1. Conclusión 01

- Determinar las principales características morfométricas de la cuenca del río Pongora y su influencia en la dinámica hidrológica.

Se determinaron las principales características morfométricas de la cuenca del río Pongora a partir del modelo digital de elevación y de procedimientos propios en un entorno de sistemas de información geográfica. La cuenca presenta un área de 1 129.77 km^2, un perímetro de 230.58 km, una longitud del cauce principal de 70.58 km, un coeficiente de compacidad de 1.921, un factor de forma de 0.227, una red de drenaje de orden 6 de Strahler, una densidad de drenaje de 1.64 km/km^2, una altitud media de 3 520 msnm, una pendiente media del cauce de 2.82 % y un tiempo de concentración de 15.01 horas.

Estos valores coincidieron de forma estrecha con los del estudio oficial de la DRTCA, con diferencias menores al 3 % en la mayoría de los parámetros, lo que confirma que la delimitación y el cálculo fueron correctos y que la caracterización constituye una base confiable para la modelación posterior. Respecto de su influencia en la dinámica hidrológica, se concluye que la forma alargada de la cuenca que reflejan el alto coeficiente de compacidad y el bajo factor de forma junto con el elevado tiempo de concentración determinan una respuesta hidrológica atenuada: En una cuenca de esta forma, los aportes de los distintos afluentes llegan a la salida desfasados en el tiempo, de manera que el pico de crecida se reparte y no se concentra de golpe, lo que reduce la propensión a crecidas súbitas. Por su parte, la pendiente del cauce, propia de un río altitudinal, anticipa un flujo veloz con potencial erosivo. En consecuencia, los caudales de diseño obtenidos, que van de 192.74 a 753.40 m^3/s, aunque importantes en magnitud, corresponden al tamaño y a la forma de la cuenca y no a un comportamiento torrencial, y las propias características del relieve prefiguran el comportamiento hidráulico que después confirmó la modelación.

5.1.2. Conclusión 02

- Analizar el comportamiento hidráulico del río Pongora bajo diferentes condiciones de caudal representativas.

Se analizó el comportamiento hidráulico del río Pongora en los seis escenarios de caudal representativos, obteniendo de cada simulación los campos de tirante, velocidad, superficie libre y número de Froude en la totalidad del dominio. El flujo resultó predominantemente subcrítico con una mediana del número de Froude entre 0.15 y 0.26 y con transiciones locales a régimen supercrítico en los tramos de mayor pendiente, donde se concentraría el potencial erosivo del agua; solo entre el 2 % y el 8 % del área inundada superó el régimen crítico. El hallazgo principal es que el río responde al aumento del caudal ganando profundidad y velocidad antes que extensión: Entre el evento de 25 años y el de 500 años el caudal se incrementó un 291 %, pero el área inundada aumentó solo un 24 % y el tirante representativo un 10 %, mientras que la zona con tirante mayor a un metro creció un 56 % y la velocidad máxima pasó de 6.03 a 7.27 m/s. La explicación está en el encañonamiento del valle, que impide que la lámina de agua se expanda lateralmente y obliga al caudal adicional a concentrarse en el cauce. Esto es consistente con la ecuación de continuidad, $Q = V \cdot A$: En una sección transversal confinada por laderas empinadas, el área mojada A crece poco con la profundidad porque el ancho disponible es casi constante, de modo que, ante un incremento grande de Q, la mayor parte del ajuste debe manifestarse como un aumento de la velocidad V y no del tirante. El análisis de los puntos de control mostró que el tirante aumenta de forma consistente con el periodo de retorno a lo largo de todo el tramo, y que en el eje del puente proyectado varía entre 2.59 y 4.20 m, en una zona de remanso con velocidades bajas, en tanto que las mayores velocidades y con ellas el mayor riesgo de socavación se localizan inmediatamente aguas abajo, en la caída del cauce. Se concluye que el comportamiento hidráulico del tramo está gobernado por el confinamiento del valle, de modo que el peligro por inundación se explica más por la profundidad y la fuerza del agua que por la extensión de la mancha, un rasgo que resulta determinante para el planteamiento de las medidas de protección. Se exceptúa de esta lectura la zona de la confluencia con el tributario, donde la ausencia de un hidrograma propio para ese ramal subestima la inundación real y los resultados deben tomarse con reserva.

5.1.3. Conclusión 03

- Implementar un modelo numérico con elementos finitos que simule de manera adecuada el flujo del río Pongora.

Se implementó un modelo numérico con elementos finitos que simula el flujo del río Pongora. La malla se generó con procedimientos propios en Python, mediante una triangulación de Delaunay restringida con control de calidad, y quedó conformada por 30 348 nodos y 60 265 elementos, con un refinamiento mayor en el cauce aristas del orden de 25 m y más grueso en la llanura de inundación del orden de 50 m, de modo de concentrar la resolución donde el flujo es más complejo. La malla presentó buena calidad geométrica, con un ángulo mínimo medio de 45°, una relación de aspecto media cercana a la unidad y sin elementos degenerados, lo que garantiza que la discretización no introduce errores numéricos relevantes. La simulación se realizó con el coeficiente de rugosidad de Manning adoptado para el cauce y bajo un régimen permanente para cada caudal de diseño, con un periodo de estabilización previo. El modelo simuló el flujo de manera numéricamente consistente, lo que se comprobó por varias vías complementarias, que deben distinguirse según lo que efectivamente demuestran. Como **verificación numérica** del esquema de cálculo: El balance de masa se cerró con una diferencia menor al 0.1 % entre el caudal que entra y el que sale del dominio, y la pendiente de la superficie del agua y la cota de fondo en la salida reprodujeron las condiciones de contorno impuestas con diferencias mínimas del orden de centímetros en la cota; estos resultados demuestran que el esquema numérico conserva masa y es internamente estable, pero no demuestran por sí solos que el tirante, la velocidad o el coeficiente de Manning adoptado sean físicamente correctos. Como **verificación cualitativa de la correspondencia espacial** con condiciones independientes: El tirante máximo a lo largo del thalweg resultó coherente con el tirante representativo del conjunto del dominio, y el área de cultivo inundada coincidió en un 81 % con la declarada por la Autoridad Nacional del Agua, aunque ambas fuentes definen la superficie afectada con criterios distintos, por lo que esta coincidencia de orden de magnitud no constituye una validación cuantitativa estricta. Se concluye que el modelo constituye una herramienta que representa de forma numéricamente consistente y espacialmente coherente el flujo del río en el tramo de estudio, con la reserva de que la verificación de campo tuvo un alcance focalizado —tres de los veintitrés puntos prioritarios, sin mediciones directas de tirante o velocidad durante una avenida— y admite una comprobación más extensa y una validación física cuantitativa en trabajos posteriores, idealmente tras una crecida real.

5.1.4. Conclusión 04

- Contrastar las características morfométricas de la cuenca con los resultados de la modelación numérica para verificar su consistencia respecto al comportamiento hidráulico del río Pongora.

Se contrastaron las características morfométricas y físicas de la cuenca con los resultados de la modelación numérica y se verificó una correspondencia consistente entre unas y otros, sin que ello implique una relación causal demostrada estadísticamente entre ambas dimensiones de la misma variable independiente. El confinamiento del valle es consistente con que el agua gane profundidad en lugar de extenderse, tal como reflejó el modesto crecimiento del área inundada frente al aumento del caudal; la pendiente del cauce, de 2.82 %, es coherente con las velocidades altas y el régimen mixto observados; la margen derecha, confinada por los cerros, se refleja en su menor inundación en el tramo del puente, donde el análisis por márgenes arrojó 54.31 ha frente a las 64.53 ha de la margen izquierda; esta última, más baja y ubicada donde el valle se abre, es consistente con que allí se concentren las parcelas, las viviendas y, con ellas, el peligro; e incluso el descenso del thalweg según el perfil del terreno se corresponde con la superficie del agua que entregó la simulación. Esta correspondencia no es casual: El modelo calcula por dónde va el agua únicamente a partir del terreno, de modo que el hecho de que sus resultados reproduzcan los rasgos físicos de la cuenca constituye un indicio de coherencia interna de la modelación, no una validación física independiente. Se concluye que la caracterización física de la cuenca es consistente, sector por sector, con el comportamiento hidráulico obtenido en la modelación, lo que indica que el análisis morfométrico y el análisis numérico —ambos componentes de la variable independiente— son coherentes entre sí y se respaldan mutuamente, sin que esto equivalga a establecer que la forma de la cuenca y de su valle sea la causa demostrada del comportamiento del río frente a las crecidas.

5.1.5. Conclusión 05

- Proponer lineamientos técnicos que contribuyan a la gestión del recurso hídrico y a la reducción de riesgos asociados al río Pongora.

Se propusieron lineamientos técnicos para la protección del tramo y la gestión del riesgo, derivados directamente de los resultados de la evaluación hidráulica. A partir de los tirantes del evento de diseño de 140 años adoptado como caudal de diseño del puente según el criterio normativo se predimensionó una defensa ribereña organizada en cinco subtramos sobre la margen izquierda, que es la más comprometida, con muros de gaviones de entre 4.00 y 6.00 m de altura definidos a partir del tirante calculado en cada sector más un borde libre. La verificación con los criterios de Maccaferri mostró que las velocidades del flujo se encuentran dentro del rango admisible para los gaviones en los cinco subtramos, pero que el subtramo situado inmediatamente aguas abajo del puente, con la mayor altura requerida, supera el límite recomendado para esa solución y demandaría un enrocado o una estructura escalonada especial. Este mismo sector coincide con un tramo de peligro que ninguna ficha oficial había considerado, de modo que la evaluación no solo dimensionó la defensa, sino que detectó un vacío en las intervenciones planificadas por el Estado. Para el pie de la defensa en el entorno del puente se adoptó, de manera conservadora, la profundidad de socavación del estudio oficial (5.72 m). El cálculo propio de socavación por el método de Lischtvan-Levediev arrojó valores nulos en los tramos de cauce muy grueso del dominio, por lo que se prefirió el dato oficial como valor secundario adoptado —no como resultado propio— para no subestimar la profundidad de cimentación; esta limitación se reconoce explícitamente y se traslada a las Recomendaciones. Con un factor de seguridad, ese valor conduce a una longitud de cimentación del orden de 11.44 m. Se concluye que los resultados de la evaluación hidráulica permiten plantear lineamientos técnicos concretos —ubicación, altura y tipo de defensa por subtramo, y profundidad de cimentación— útiles para la gestión del recurso hídrico y la reducción del riesgo por inundación, lineamientos que además aportan el sustento numérico que la propia Autoridad Nacional del Agua reconoce como necesario. Todo ello con la precisión de que se trata de un predimensionamiento hidráulico preliminar, que constituye la base para el diseño estructural definitivo y que deberá completarse con un levantamiento topográfico de las secciones y la verificación geotécnica de la estabilidad.

5.1.6. Conclusión general

- Proponer lineamientos técnicos que contribuyan a la gestión del recurso hídrico y a la reducción de riesgos asociados al río Pongora.

Se evaluó el comportamiento hidráulico del río Pongora combinando el análisis morfométrico de su cuenca con la modelación numérica bidimensional por elementos finitos, y ambos enfoques resultaron complementarios y coherentes entre sí. La cuenca se caracterizó con procedimientos propios en un entorno de sistemas de información geográfica y quedó validada frente al estudio oficial de la DRTCA, con una diferencia de apenas 0.19 % en el área (1 129.77 km^2) y menor al 3 % en la mayoría de los parámetros; esta coincidencia dio solidez al punto de partida de toda la cadena de cálculo. Sobre esa base se obtuvieron los caudales de diseño mediante un análisis de frecuencia con la distribución Log-Pearson tipo III y una modelación hidrológica distribuida, y se simularon seis escenarios de caudal, de 25 a 500 años de periodo de retorno (de 192.74 a 753.40 m^3/s), con el modelo TELEMAC-2D sobre una malla de 30 348 nodos y 60 265 elementos. La evaluación mostró que el río, en el tramo del puente proyectado, presenta un flujo predominantemente subcrítico que, por el encañonamiento del valle, gana profundidad y velocidad mucho más que extensión: Al cuadruplicarse el caudal entre el evento de 25 y el de 500 años, el área inundada creció solo un 24 %, mientras que la zona de mayor profundidad y la velocidad del flujo aumentaron de forma notoria. Este comportamiento se verificó por varias vías independientes —el balance de masa del modelo, la coincidencia con las fichas de la Autoridad Nacional del Agua y con un estudio previo en la zona, y la validación cruzada del área de cultivo inundada— y sirvió de base para predimensionar una defensa ribereña con ubicaciones, alturas y tipo de solución definidos. Se concluye que la combinación del análisis morfométrico y la modelación con elementos finitos permitió evaluar el comportamiento hidráulico del río Pongora con un nivel de detalle suficiente para sustentar la gestión del peligro por inundación en el tramo. Los resultados presentan consistencia numérica y correspondencia espacial cualitativa con la información de campo y con las fuentes oficiales disponibles, dentro de las limitaciones de información topográfica, batimétrica y observacional reconocidas en este trabajo, y son coherentes con que el peligro de este río esté asociado principalmente a la profundidad y la fuerza del agua en un valle confinado, más que a la extensión de la inundación.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar un levantamiento topográfico y batimétrico de detalle de las secciones del cauce en el tramo del puente proyectado. El predimensionamiento de la defensa desarrollado en esta investigación se apoyó en el modelo digital de elevación ALOS PALSAR de 12.5 m de resolución, adecuado para el análisis hidráulico regional, pero insuficiente para el diseño estructural definitivo. La medición directa de las secciones transversales, incluida la geometría real del fondo del cauce, permitiría ajustar la cota de cimentación, la altura de los muros y la profundidad de la uña de socavación con la precisión que exige la etapa de diseño.
- Se recomienda complementar el predimensionamiento hidráulico con la verificación geotécnica y estructural de la defensa. El presente trabajo definió la ubicación, la altura y el tipo de solución de cada subtramo a partir de criterios hidráulicos, pero el diseño definitivo debe incluir los análisis de estabilidad al vuelco y al deslizamiento, la capacidad portante del terreno de fundación y los empujes actuantes, así como un estudio de mecánica de suelos del sitio, que quedaron fuera del alcance de esta investigación.
- Se recomienda calibrar el coeficiente de rugosidad de Manning de forma diferenciada por zonas cauce, llanura de inundación y áreas con vegetación, en lugar del valor uniforme adoptado en esta investigación, apoyándose en observaciones de campo. Asimismo, se recomienda gestionar la instalación o el aprovechamiento de una estación de aforo en el tramo, que permita contrastar los caudales calculados con mediciones reales y mejorar así la representación del flujo.
- Se recomienda realizar, como trabajo futuro, un análisis de sensibilidad de la condición de frontera de salida, contrastando el tirante normal adoptado con variaciones de $\pm 10\,\%$ y $\pm 20\,\%$ sobre la cota de salida, para cuantificar su influencia en los resultados aguas arriba del dominio modelado.
- Se recomienda realizar, como trabajo futuro, un análisis de independencia de malla, generando al menos dos mallas adicionales de distinta densidad (más gruesa y más fina) en BlueKenue y comparando el tirante y el área inundada entre refinamientos consecutivos, a fin de sustentar formalmente que la resolución adoptada (30 348 nodos) no introduce sesgo numérico en los resultados.
- Se recomienda acompañar las medidas estructurales de protección con medidas no estructurales sobre la margen izquierda, que es la más comprometida. Dado que el peligro en este tramo se explica por la profundidad y la rapidez del agua más que por la extensión de la inundación, resultan especialmente pertinentes el control del uso del suelo evitando el asentamiento de nuevas viviendas y parcelas en la franja inundable y la implementación de un sistema de alerta temprana para la población expuesta.

5.3. Trabajos futuros

- Extender la modelación a más tramos y sectores de la cuenca del río Pongora, más allá del tramo del puente de 8 km analizado en esta investigación, integrando nuevos puntos de interés hacia un modelo hidráulico de mayor cobertura. La ampliación del dominio permitiría evaluar el comportamiento del río y el peligro por inundación en otros sectores poblados y agrícolas de la cuenca, y construir un panorama más completo de las zonas críticas a lo largo de su recorrido.
- Desarrollar la modelación en régimen no permanente (transitorio), alimentando el modelo con el hidrograma completo de la crecida en lugar de un caudal constante, e incorporando el aporte propio del tributario en la zona de la confluencia. Esta investigación asumió un régimen permanente y un único ingreso de caudal en la frontera de aguas arriba, por lo que la inundación en el entorno de la confluencia quedó subestimada; un modelo transitorio con aporte lateral superaría esa limitación y representaría la evolución temporal de la crecida.
- Acoplar al modelo hidrodinámico un módulo de transporte de sedimentos y de socavación morfodinámica, que estime la evolución del fondo del cauce durante la crecida. En este trabajo, el método de Lischtvan-Levediev devolvió profundidades de socavación nulas en los tramos de cauce muy ancho, por una limitación propia del método; un enfoque morfodinámico permitiría estimar la socavación real en esos sectores y afinar el diseño del pie de las defensas.
- Realizar un estudio comparativo entre distintos modelos numéricos TELEMAC-2D frente a HEC-RAS en una y dos dimensiones, y frente a IBER aplicados al mismo tramo del río Pongora. Una comparación directa permitiría cuantificar la ganancia de precisión del enfoque bidimensional por elementos finitos respecto de los enfoques más simples, y respaldar de forma empírica la elección del método.
- Incorporar escenarios de cambio climático y de no estacionariedad en el análisis de frecuencia de los caudales de diseño. El análisis hidrológico de esta investigación asumió la estacionariedad de las series de precipitación; el uso de proyecciones climáticas permitiría evaluar cómo podría evolucionar la magnitud y la frecuencia de las crecidas del río Pongora en el futuro, y anticipar el cambio en el nivel de peligro (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022).
- Desarrollar un análisis de riesgo integral que combine el peligro hidráulico obtenido en esta investigación con la vulnerabilidad y la exposición de la población, las viviendas, los cultivos y la infraestructura del tramo. Al sumar a los resultados hidráulicos una caracterización socioeconómica de los elementos expuestos, se obtendría un mapa de riesgo y una base cuantitativa para priorizar las intervenciones y orientar la planificación territorial de la zona.

Anexo: Panel fotográfico de la visita de campo

La visita de campo se realizó el 4 de septiembre de 2026 y recorrió tres sectores representativos del tramo de estudio: El entorno del puente proyectado con sus parcelas de cultivo, la sección de aforo con su infraestructura asociada y el tramo de aguas abajo con la defensa de gaviones existente. Las fotografías que se presentan a continuación fueron tomadas con registro georreferenciado y respaldan la verificación de campo desarrollada en el cuerpo del informe.

Figura 53

Reconocimiento del sector del puente proyectado y de la sección de aforo



(a) Parcelas de cultivo con el puente proyectado al fondo



(b) Medición del ancho del cauce en la sección de aforo

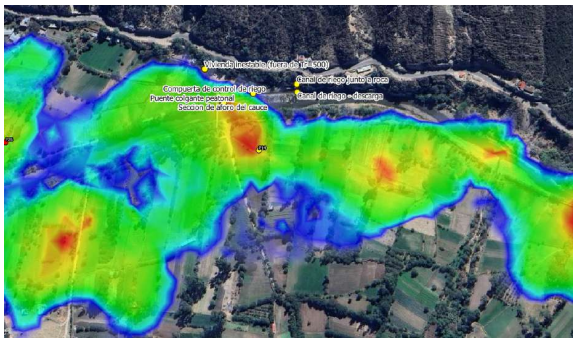
Nota. Registro de campo georreferenciado, 4 de septiembre de 2026.

Figura 54

Elementos expuestos en la margen izquierda del tramo del puente



(a) Vivienda emplazada en zona ribereña expuesta



(b) Sector del punto de control con los elementos expuestos identificados

Nota. Registro de campo georreferenciado, 4 de septiembre de 2026.

Figura 55

Defensa de gaviones existente en el tramo de aguas abajo



(a) Muro de gaviones existente en el tramo de aguas abajo



(b) Vista general del muro de gaviones existente

Nota. Registro de campo georreferenciado, 4 de septiembre de 2026.

Figura 56

Detalle y estado de conservación del muro de gaviones existente



(a) Detalle de la estructura de las cajas de gaviones



(b) Estado de conservación del muro de gaviones

Nota. Registro de campo georreferenciado, 4 de septiembre de 2026.

Abouelsaad, O., Hassan, A., … Hinkelmann, R. (2024). Identifying manning roughness coefficient using automatic calibration method and simulation of pollution incidents in the Nile River, Egypt. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *55*. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101908

Acolita. (2012). *Calcular automáticamente los parámetros morfométricos de una cuenca* [Autor: franzpc; actualizado en 2025]. Consultado el 10 de septiembre de 2026, desde https://acolita.com/calcular-automaticamente-parametros-morfometricos-cuenca-idrisi-arcgis/

Aguilar Torres, T. M. (2025). *Comparación del modelamiento hidráulico mediante HEC-RAS e Iber con fines de prevención ante inundaciones: caso de estudio del río Tambo en Arequipa, Perú* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil]. Universidad Católica de Santa María.

Altamirano Pariona, C. (2024). *Evaluación de riesgos de inundación para identificar áreas vulnerables de la localidad de Ccayarpachi, Huamanga 2024* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Agrícola]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Anonymous. (2025). Development of open-source tools for event-based hydrological modelling using GIS and Python. *Water*, *17*(14), 2160. https://doi.org/10.3390/w17142160

Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa.

Aquise Obregon, V. (2017). *Aplicación de las ecuaciones de Saint Venant al modelamiento bidimensional de cuencas y ríos* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Arana-Ruedas, D. P. R., Pino-Vargas, E., … Huayna, G. (2025). Mapping Flood-Prone Areas Using GIS and Morphometric Analysis in the Mantaro Watershed, Peru: Approach to Susceptibility Assessment and Management. *Sustainability*, *17*(17). https://doi.org/10.3390/su17177809

Autoridad Nacional del Agua. (2011). *Reglamento para la delimitación y mantenimiento de fajas marginales (Resolución Jefatural N.° 300-2011-ANA)*. Autoridad Nacional del Agua. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/fajas_marginales_0.pdf

Autoridad Nacional del Agua. (2025). *Identificación de puntos críticos con peligro de inundación, flujo de detritos (huaico) y erosión fluvial en los principales ríos y quebradas 2025* (Informe técnico). Autoridad Nacional del Agua, Dirección de Planificación y Desarrollo de los Recursos Hídricos. Lima, Perú. https://sinia.minam.gob.pe/documentos/identificacion-puntos-criticos-peligro-inundacion-flujo-detritos

Bautista Cabrera, M. Y., & Zuluaga Isuiza, M. S. (2025). *Evaluación de zonas de inundación ante el incremento de caudal mediante modelamiento hidrodinámico en la*

comunidad de Yoyato, Satipo, Junín [Trabajo de suficiencia profesional para optar el título profesional de Ingeniero Civil]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Belizario Quispe, M., & Pancca Cruz, Y. G. (2020). *Comparativo del comportamiento hidráulico de zonas inundables con el software Iber y HEC-RAS del río Coata C.P. Almosanche* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Topógrafo y Agrimensor]. Universidad Nacional del Altiplano.

Bhat, M. S., Alam, A., ... Ahmad, S. (2022). Quantitative morphometric analysis of the Veshav and Rembi Ara watersheds, India, using quantum GIS. *Applied Geomatics*, *14*(4), 709-728. https://doi.org/10.1007/s12518-022-00417-3

Bhunya, P. K., Panda, S. N., & Goel, M. K. (2014). A review of the synthetic unit hydrograph: From the empirical UH to advanced geomorphological methods. *Hydrological Sciences Journal*, *59*(3-4), 717-732. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.870664

Bladé, E., Cea, L., ... Coll, A. (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, *30*(1), 1-10. https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004

Blöschl, G., Buttinger-Kreuzhuber, A., ... Stiefelmeyer, H. (2024). Hyper-Resolution Flood Hazard Mapping at the National Scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *24*(6), 2071-2091. https://doi.org/10.5194/nhess-24-2071-2024

Broich, K., Pflugbeil, T., ... Nguyen, H. (2020). Using TELEMAC-2D for Hydrodynamic Modeling of Rainfall-Runoff. *Proceedings of the TELEMAC-MASCARET User Conference 2019*. https://doi.org/10.5281/zenodo.3611524

Byaruhanga, N., Kibirige, D., ... Mkhonta, G. (2024). Evolution of flood prediction and forecasting models for flood early warning systems: A scoping review. *Water*, *16*(13), 1763. https://doi.org/10.3390/w16131763

Caballero Romero, A. (2014). *Metodología integral innovadora para planes y tesis: La metodología del cómo formularlos*. Cengage Learning.

Cabrera-Balarezo, J. J., Timbe-Castro, L. M., & Crespo-Sánchez, P. J. (2019). Evaluation of the HEC-HMS model for the hydrological simulation of a paramo basin. *DYNA*, *86*(210), 338-344. https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.70738

Canchari Ramos, E. (2022). *Evaluación del riesgo por inundación empleando técnicas fotogramétricas en la quebrada Islachayoq de la ciudad de Huamanga - Ayacucho, 2022* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Cardenas-Mercado, L., Escobar-Vargas, J., ... Torres, A. (2023). Integration of physically-based numerical tools and socio-hydrological variables in urban flood modeling. *Journal of Hydrology*, *625*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129974

Castillo Cruz, V. (2017a). *Modelamiento hidráulico 1D–2D y transporte de sedimentos para el dimensionamiento de la defensa ribereña río Pongora – Pacaycasa – Ayacucho* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. https://repositorio.unsch.edu.pe/items/1caccb6e-ce4f-4d8c-ac06-0592dd87f682

Castillo Cruz, V. (2017b). *Modelamiento hidráulico 1D-2D y transporte de sedimentos para el dimensionamiento de la defensa ribereña río Pongora - Pacaycasa - Ayacucho* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Cea, L., & Bladé, E. (2015). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*, *51*(7), 5464-5486. https://doi.org/10.1002/2014WR016547

Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2014). *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales (2.ª versión) (Resolución Jefatural N.° 112-2014-CENEPRED/J)*. CENEPRED. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. (2024). *Aumento de la frecuencia de eventos climáticos extremos*. CEPLAN. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://observatorio.ceplan.gob.pe/ficha/t57

Chaithong, T. (2022). Flash flood susceptibility assessment based on morphometric aspects and hydrological approaches in the Pai River basin, Mae Hong Son, Thailand. *Water*, *14*(19), 3174. https://doi.org/10.3390/w14193174

Chissende, A., Mehmood, M. S., ... Wang, Z. (2025). Riverine Flood Susceptibility Assessment Using Drainage Basin Morphometry in the Bahe River. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *117*. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105181

Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

Cifuentes-Herrera, L. F., Romero-Duque, L. P., ... Trilleras, J. M. (2025). Integrated Water Resource Management under Ecosystem Services Approach—The Chimulala Micro-watershed, Peru. *Environmental Management*, *75*(4), 945-960. https://doi.org/10.1007/s00267-024-02092-z

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2023). *Anuario estadístico de América Latina y el Caribe 2022*. CEPAL. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://www.cepal.org/es/publicaciones/anuario-estadistico

Congreso de la República del Perú. (2009). *Ley de Recursos Hídricos (Ley N.° 29338)*. Autoridad Nacional del Agua. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/ley_29338_0_2.pdf

Coppo Frías, M., Liu, S., ... Bauer-Gottwein, P. (2025). Improving 2D Hydraulic Modelling in Floodplain Areas with ICESat-2 Data: A Case Study in the Upstream Yellow River. *Remote Sensing of Environment*, *331*. https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115008

Das, S. (2021). Accuracy assessment of different open-source digital elevation model through morphometric analysis for a semi-arid river basin in the western part of India. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, *5*(2), 24. https://doi.org/10.1007/s41651-021-00089-4

Dazzi, S., Vacondio, R., & Mignosa, P. (2020). Internal boundary conditions for a GPU-accelerated 2D shallow water model: Implementation and applications. *Advances in Water Resources*, *137*, 103525. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103525

Del Águila, S., & Mejía, A. (2021). Caracterización morfométrica de dos cuencas altoandinas del Perú utilizando sistemas de información geográfica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *12*(2), 538-562. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-02-12

Del Águila Ríos, Y., & Mejía Marcacuzco, J. A. (2021). Caracterización morfométrica de dos cuencas altoandinas del Perú (Anya y Mchique, Junín) utilizando sistemas de información geográfica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *12*(2), 507-557. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-02-12

Djafri, S. A., Cherhabil, S., ... Madi, M. (2024). Flood modeling using HEC-RAS 2D and IBER 2D: A comparative study. *Water Supply*, *24*(9), 3061-3076. https://doi.org/10.2166/ws.2024.184

Duque-Sarango, P., Patiño, D., & López, X. (2019). Evaluación del sistema de modelamiento hidrológico HEC-HMS para la simulación hidrológica de una microcuenca andina tropical. *Información Tecnológica*, *30*(6), 351-362. https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600351

El Comercio. (2019, marzo). *Ayacucho: desborde del río Totorita destruyó cultivos en comunidad de Pongora*. Consultado el 8 de septiembre de 2026, desde https://elcomercio.pe/peru/ayacucho/ayacucho-desborde-rio-totorita-destruyo-cultivos-comunidad-pongora-video-noticia-nndc-614324-noticia/

Électricité de France, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement. (2020). *TELEMAC-2D modelling system: Principle note*. openTELEMAC-MASCARET Consortium. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://www.opentelemac.org/downloads/MANUALS/TELEMAC-2D/prin30_gb.pdf

El-Hames, A. S. (2012). An empirical method for peak discharge prediction in ungauged arid and semi-arid region catchments based on morphological parameters and SCS curve number. *Journal of Hydrology*, *456–457*, 94-100. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.016

England, J. F., Cohn, T. A., ... Mason, R. R. (2018). *Guidelines for determining flood flow frequency: Bulletin 17C* (Techniques and Methods 4-B5). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/tm4B5

Enu, K. B., Merk, F., ... Disse, M. (2025). A scenario-based analysis of wetlands as nature-based solutions for flood risk mitigation using the TELEMAC-2D model. *Nature-Based Solutions*, *7*. https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2025.100236

Environmental Systems Research Institute. (2024). *An overview of the Hydrology toolset (Spatial Analyst)*. ESRI. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm

Felix Pahuara, C. (2023a). *Evaluación del riesgo por inundación fluvial en la cuenca del río Pongora - Comunidad de Pongora - Ayacucho, 2022* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Felix Pahuara, C. (2023b). *Evaluación del riesgo por inundación fluvial en la cuenca del río Pongora – Comunidad de Pongora – Ayacucho, 2022* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. https://repositorio.unsch.edu.pe/items/b5201bf1-785f-4001-8d70-036fff72c8f0

García Castro, E. G. (2023). *Estimación de caudales máximos en el río Chira, utilizando métodos estadísticos de Gumbel y de Pearson tipo III* [Trabajo de investigación para optar el título profesional de Ingeniero Agrícola]. Universidad Nacional de Piura.

García-Feal, O., González-Cao, J., … Formella, A. (2018). An accelerated tool for flood modelling based on Iber. *Water*, *10*(10), 1459. https://doi.org/10.3390/w10101459

Godara, N., Bruland, O., & Alfredsen, K. (2023). Simulation of flash flood peaks in a small and steep catchment using rain-on-grid technique. *Journal of Flood Risk Management*, *16*(1). https://doi.org/10.1111/jfr3.12898

Godara, N., Bruland, O., & Alfredsen, K. (2024a). Comparison of two hydrodynamic models for their rain-on-grid technique to simulate flash floods in steep catchment. *Frontiers in Water*, *6*. https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1384205

Godara, N., Bruland, O., & Alfredsen, K. (2024b). Comparison of two hydrodynamic models for their rain-on-grid technique to simulate flash floods in steep catchment. *Frontiers in Water*, *6*, 1384205. https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1384205

Gravelius, H. (1914). *Grundriß der gesamten Gewässerkunde, Band 1: Flußkunde*. G. J. Göschen'sche Verlagshandlung.

Grimaldi, S., Petroselli, A., … Porfiri, M. (2012). Time of concentration: A paradox in modern hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, *57*(2), 217-228. https://doi.org/10.1080/02626667.2011.644244

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Hodges, B. R. (2019). Conservative finite-volume forms of the Saint-Venant equations for hydrology and urban drainage. *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*(3), 1281-1304. https://doi.org/10.5194/hess-23-1281-2019

Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, *13*(1), 350-361. https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, *56*(3), 275-370. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2

Huamani Escalante, M., & Monago Tarazona, I. L. (2025). *Modelamiento numérico del flujo de escombros en la cuenca del río Toro, Chanchamayo, 2023* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil]. Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa.

Huaracc Chancasanampa, R. (2018). *Nivel de riesgo a inundaciones en la quebrada Tarahuayco en el distrito de Ayacucho* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report* (inf. téc.). Cambridge University Press. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

Ismail, M., Singh, H., ... Yousuf, N. (2022). Quantitative morphometric analysis of Veshav and Rembi Ara watersheds, India, using quantum GIS. *Applied Geomatics*, *14*, 119-134. https://doi.org/10.1007/s12518-022-00417-3

Jan, C.-D. (2014). *Gradually-varied flow profiles in open channels: Analytical solutions by using Gaussian hypergeometric function*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35242-3

Joy, M. A. R., Upaul, S., ... Amin, F. M. R. (2023). Application of GIS and Remote Sensing in Morphometric Analysis of River Basin at the South-Western Part of Great Ganges Delta, Bangladesh. *Hydrology Research*, *54*(6), 739-755. https://doi.org/10.2166/nh.2023.087

Kaveh, K., Bui, M. D., & Rutschmann, P. (2019). Integration of artificial neural networks into TELEMAC-MASCARET system, new concepts for hydromorphodynamic modeling. *Advances in Engineering Software*, *132*, 18-28. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.03.011

Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, *10*(6), 362.

Lamichhane, S., Devkota, N., ... Tamrakar, J. (2023). Estimation of hydraulic parameter (Manning's roughness coefficient) in mountainous river at middle stage of Hindu Kush Himalaya region. *Journal of Innovations in Engineering Education*, *6*(1), 1-10. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://www.nepjol.info/index.php/jiee/article/view/61092

Li, G., Liu, J., & Shao, W. (2022). Flood Risk Assessment Using TELEMAC-2D Models Integrated with Multi-Index Analysis in Shenzhen River Basin, China. *Water*, *14*(16). https://doi.org/10.3390/w14162513

Liu, Q., Zheng, C., ... Lian, J. (2026). A physically constrained proxy framework considering a process-aware gating mechanism for urban flood simulation. *Water Research*, *297*. https://doi.org/10.1016/j.watres.2026.125663

Liu, Q., Zheng, J., ... Lian, J. (2026). Physics-guided liquid neural networks for rapid and physically consistent flood evolution prediction. *Water Research X*, *31*. https://doi.org/10.1016/j.wroa.2026.100557

lzu_xiaoyu. (2024). *Ejecución de ejemplos de TELEMAC en Windows 10 (tutorial de Blue Kenue)*. CSDN. Consultado el 10 de septiembre de 2026, desde https://blog.csdn.net/mxy2572185/article/details/136708190

Malik, I., Wistuba, M., ... Yu, R. (2021). Hydrodynamic parameters of floods and related bank erosion events indicated from tree rings and 2D hydrodynamic model for a small ungauged catchment (Sudeten Mts., Poland). *Ecological Indicators*, *129*, 108021. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108021

Mangan, P., Haq, M. A., & Baral, P. (2019). Morphometric analysis of watershed using remote sensing and GIS: A case study of Nanganji River basin in Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, *12*(6), 202. https://doi.org/10.1007/s12517-019-4382-4

Mazer, K. E., Tomasek, A. A., ... Zeballos-Velarde, C. (2020). Integrated Hydrologic and Hydraulic Analysis of Torrential Flood Hazard in Arequipa, Peru. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, *171*(1), 93-110. https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2020.3347.x

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2011). *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje (Resolución Directoral N.° 20-2011-MTC/14)*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/4443017-20-2011-mtc-14

Moghim, S., Ahmadi Gharehtoragh, M., & Safaie, A. (2023). Performance of the flood models in different topographies. *Journal of Hydrology*, *620*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129446

Muñoz Izaguirre, S. A., & Hernandez Gutierrez, D. E. (2023). *Análisis hidrodinámico comparativo de inundaciones basados en modelos HEC-RAS e Iber en el distrito Reque, cuenca río Chancay, departamento de Lambayeque* [Trabajo de suficiencia profesional para optar el título profesional de Ingeniero Civil]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Musolino, G., Ahmadian, R., ... Falconer, R. A. (2020). Mapping the danger to life in flash flood events adopting a mechanics based methodology and planning evacuation routes. *Journal of Flood Risk Management*, *13*(4), e12627. https://doi.org/10.1111/jfr3.12627

National Research Council Canada. (2011). *Blue Kenue: Software tool for hydraulic modellers*. Canadian Hydraulics Centre. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://nrc.canada.ca/en/research-development/products-services/software-applications/blue-kenuetm-software-tool-hydraulic-modellers

Pallard, B., Castellarin, A., & Montanari, A. (2009). A look at the links between drainage density and flood statistics. *Hydrology and Earth System Sciences*, *13*(7), 1019-1029. https://doi.org/10.5194/hess-13-1019-2009

Pande, C. B., & Moharir, K. (2017). GIS based quantitative morphometric analysis and its consequences: A case study from Shanur River basin, Maharashtra India. *Applied Water Science*, *7*(2), 861-871. https://doi.org/10.1007/s13201-015-0298-7

Paucar Ordoñez, M. T. (2019). *Aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS y su calibración en la cuenca del río Vilcanota, Cusco, 2017* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil]. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Peraire, J., Zienkiewicz, O. C., & Morgan, K. (1986). Shallow water problems: A general explicit formulation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, *22*(3), 547-574. https://doi.org/10.1002/nme.1620220305

Pérez Campomanes, G., Romero-Valdez, K. K., ... Carbajal Llosa, C. (2026). Assessment of flood-prone areas in the Lacramarca River basin in the Santa Clemencia and Pampadura region, Peru, under climate change effects. *Hydrology*, *13*(4), 103. https://doi.org/10.3390/hydrology13040103

Pinos, J., & Timbe, L. (2019a). Performance Assessment of Two-Dimensional Hydraulic Models for Generation of Flood Inundation Maps in Mountain River Basins. *Water Science and Engineering*, *12*(1), 11-18. https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.03.001

Pinos, J., & Timbe, L. (2019b). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering*, *12*(1), 11-18. https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.03.001

Pinos, J., Timbe, L., & Timbe, E. (2020). Mountain riverine floods in Ecuador: Issues, challenges, and opportunities. *Frontiers in Water*, *2*, 545880. https://doi.org/10.3389/frwa.2020.545880

Plural Noticias. (2024). *Alertan el desborde del río Pongora e inunda campos de cultivo en la comunidad de San José de Viñaca*. Consultado el 8 de septiembre de 2026, desde https://www.facebook.com/pluralnoticias

Ponce, V. M. (2014). *On the classification of open channel flow regimes*. San Diego State University. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://ponce.sdsu.edu/on_the_classification_of_open_channel_flow_regimes.html

QGIS Development Team. (2024). *QGIS geographic information system*. Open Source Geospatial Foundation Project. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://qgis.org

Quispe Huamán, E. (2019). *Evaluación hidrológica e hidráulica con el modelo Iber del río Qochoq, Calca – Cusco* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/4470/253T20190495_TC.pdf

Ramírez-Granados, P., Astorga-Gättgens, A., ... Henríquez Henríquez, C. (2020). Morfometría de la cuenca alta del río Páez, Costa Rica, y su relación con la infiltración. *UNED Research Journal*, *12*(2), e3142. https://doi.org/10.22458/urj.v12i2.3142

Ramos Ventura, A. (2023). *Simulación hidrológica e hidráulica del río Yucay con fines de diseño de estructuras de control de inundaciones y defensas ribereñas en el sector Pamparque, distrito de Acos Vinchos - Huamanga - Ayacucho, 2020* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Agrícola]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Rentschler, J., & Salhab, M. (2020). *People in harm's way: Flood exposure and poverty in 189 countries* (Policy Research Working Paper N.º 9447). World Bank. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://documents1.worldbank.org/curated/en/

669141603288540994/pdf/People-in-Harms-Way-Flood-Exposure-and-Poverty-in-189-Countries.pdf

Rocha Felices, A. (2007). *Hidráulica de tuberías y canales*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil.

Rodas Soto, A. A. (2024). *Modelamiento hidrológico e hidráulico, empleando el software HEC-RAS, para determinación de peligrosidad ante eventos de máximas avenidas en la quebrada Hatunhuayco - Cusco* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Santillán, D., Cueto-Felgueroso, L., ... Garrote, L. (2020). Influence of erodible beds on shallow water hydrodynamics during flood events. *Water*, *12*(12), 3340. https://doi.org/10.3390/w12123340

Scarlatos, P. D. (1982). A pure finite-element method for the Saint-Venant equations. *Coastal Engineering*, *6*(1), 27-45. https://doi.org/10.1016/0378-3839(82)90013-8

Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, *67*(5), 597-646. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2

Sequeiros Cuba, M. N., & Farfán Encalada, S. L. (2019). *Evaluación hidrológico e hidráulico con el modelo Iber para determinar el riesgo por inundación en la población ribereña al río Qochoq, provincia Calca - región Cusco 2017* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo]. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Serra, M., Herrera, C. G., & Niz, A. E. (2019). Teledetección aplicada al mapeo geomorfológico de los volcanes de la cuenca alta del río Chaschuil, provincia de Catamarca, Argentina. *Tecnura*, *23*(60), 13-26. https://doi.org/10.14483/22487638.14642

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2020). *Desarrollo de curvas pluviométricas intensidad-duración-frecuencia (IDF) en el Perú*. SENAMHI. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-106.pdf

Sherman, L. K. (1932). The relation of hydrographs of runoff to size and character of drainage-basins. *Transactions, American Geophysical Union*, *13*(1), 332-339. https://doi.org/10.1029/TR013i001p00332

Sociedad de Comercio Exterior del Perú. (2024). *Más de 11 millones de personas en riesgo por inundaciones y huaicos*. ComexPerú. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://www.comexperu.org.pe/articulo/mas-de-11-millones-de-personas-en-riesgo-por-inundaciones-y-huaicos

Soto-Escobar, C., Zambrano-Bigiarini, M., ... Garreaud, R. (2026). Developing Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves using sub-daily gridded and in situ datasets: characterising precipitation extremes in a drying climate. *Hydrology and Earth System Sciences*, *30*, 91-117. https://doi.org/10.5194/hess-30-91-2026

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, *63*(11), 1117-1142. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, *38*(6), 913-920. https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913

Sutradhar, S., & Mondal, P. (2023). Prioritization of Watersheds Based on Morphometric Assessment in Relation to Flood Management: A Case Study of Ajay River Basin, Eastern India. *Watershed Ecology and the Environment*, *5*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.wsee.2022.11.011

Tassew, B. G., Belete, M. A., & Miegel, K. (2019). Application of HEC-HMS model for flow simulation in the Lake Tana basin: The case of Gilgel Abay catchment, upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrology*, *6*(1), 21. https://doi.org/10.3390/hydrology6010021

Tenorio Chilcón, L. G., & Vidarte Romero, C. O. (2024). *Análisis de la socavación local del puente Cementerio y el puente Oscar Burga aplicando los modelos HEC-RAS e Iber, Chota, 2023* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil]. Universidad Nacional Autónoma de Chota.

Toro, E. F. (2001). *Shock-capturing methods for free-surface shallow flows*. John Wiley & Sons.

Torrefranca, I., & Otadoy, R. E. (2024). GIS-based watershed characterization and morphometric analysis in Bohol Watersheds, Philippines. *Geology, Ecology, and Landscapes*, *8*(4), 527-538. https://doi.org/10.1080/24749508.2022.2158554

Torres-Mercado, C. E., Villafuerte-Jeremias, J. A., ... Pérez-Campomanes, G. (2025). Comparison of flood scenarios in the Cunas River under the influence of climate change. *Hydrology*, *12*(5), 117. https://doi.org/10.3390/hydrology12050117

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2020). The human cost of disasters: An overview of the last 20 years (2000–2019). *UNDRR/CRED*. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019

U.S. Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS river analysis system: 2D modeling user's manual, version 5.0*. Hydrologic Engineering Center. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx

U.S. Army Corps of Engineers. (2023). *Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical reference manual*. Hydrologic Engineering Center. Consultado el 15 de enero de 2026, desde https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation.aspx

U.S. Geological Survey. (2018). *How Streamflow is Measured* [Water Science School]. Consultado el 10 de septiembre de 2026, desde https://www.usgs.gov/water-science-school/science/how-streamflow-measured

Vargas Yana, S. J. (2023). *Análisis comparativo entre los modelos hidráulicos HEC-RAS e Iber para la zonificación de áreas inundables en el distrito de Lucre - provincia de Quispicanchis - Cusco - 2022* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo]. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Vashist, K., & Singh, K. K. (2023a). HEC-RAS 2D modeling for flood inundation mapping: A case study of the Krishna River basin. *Water Practice and Technology*, *18*(4), 831-844. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.048

Vashist, K., & Singh, K. K. (2023b). HEC-RAS 2D Modeling for Flood Inundation Mapping: A Case Study of the Krishna River Basin. *Water Practice & Technology*, *18*(4), 831-844. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.048

Verboom, G. K., & Slob, A. (1984). Weakly-reflective boundary conditions for two-dimensional shallow water flow problems. *Advances in Water Resources*, *7*(4), 192-197. https://doi.org/10.1016/0309-1708(84)90018-6

Vivoni, E. R., Di Benedetto, F., ... Eltahir, E. A. B. (2008). Hypsometric control on surface and subsurface runoff. *Water Resources Research*, *44*(12), W12502. https://doi.org/10.1029/2008WR006931

Vreugdenhil, C. B. (1994). *Numerical methods for shallow-water flow*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8354-1

Wang, G.-T., & Singh, V. P. (1992). Muskingum method with variable parameters for flood routing in channels. *Journal of Hydrology*, *134*(1–4), 57-76. https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90028-T

Willner, S. N., Otto, C., & Levermann, A. (2018). Global economic response to river floods. *Nature Climate Change*, *8*(7), 594-598. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0173-2

Yan, L., Rong, H., ... Zheng, C. (2024). A novel integrated urban flood risk assessment approach based on one-two dimensional coupled hydrodynamic model and improved projection pursuit method. *Journal of Environmental Management*, *366*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121910

Yang, W., Zheng, C., ... Zheng, A. (2023). Study on urban flood simulation based on a novel model of SWTM coupling D8 flow direction and backflow effect. *Journal of Hydrology*, *621*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129608

Zevallos, J. A., Chávarri-Velarde, E. A., ... Lavado-Casimiro, W. S. (2025). Bayesian calibration of a 2D hydraulic model using a convolutional neural network emulator. *Environmental Modelling & Software*, *193*, 106621. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106621

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Nithiarasu, P. (2014). *The finite element method for fluid dynamics* (7.ª ed.). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/C2009-0-26328-8

Anexo 1: Matriz de consistencia

Cuadro 37

Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Metodología
¿Cuál es el comportamiento hidráulico del río Pongora y cómo puede evaluarse a partir del análisis morfométrico y la modelación numérica con elementos finitos en Ayacucho – 2025?	Evaluar el comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico de su cuenca y la modelación numérica con elementos finitos, en la región Ayacucho – 2025.	El comportamiento hidráulico del río Pongora puede evaluarse de manera precisa mediante el análisis morfométrico de su cuenca y la modelación numérica con elementos finitos, lo que permitirá identificar las condiciones de flujo y los riesgos asociados en la región Ayacucho.	**V.I. (X):** Análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos **Dimensiones:** X1: Parámetros morfométricos de forma X2: Parámetros morfométricos de relieve y red de drenaje X3: Modelación numérica con elementos finitos **V.D. (Y):** Comportamiento hidráulico del río Pongora **Dimensiones:** Y1: Parámetros hidráulicos del flujo (simulados) Y2: Extensión de la inundación (resultado espacial) Y3: Peligrosidad por inundación (resultado final)	**Método:** Deductivo **Orientación:** Aplicada **Enfoque:** Cuantitativo **Alcance:** Aplicativo **Nivel:** Aplicativo **Diseño:** No experimental, transversal, retrospectivo **Población:** Estaciones meteorológicas del SENAMHI del ámbito de la cuenca del río Pongora y sus registros históricos de precipitación máxima en 24 h **Muestra:** Seis estaciones (Quinua, Tambillo, Cuchoquesera, Pucaloma, Chontaca y Chiara), 159 registros de precipitación máxima en 24 h; muestreo no probabilístico intencional **Técnica:** Análisis morfométrico en SIG, análisis de frecuencia (Log-Pearson tipo III), modelación hidrológica (HEC-HMS), modelación hidráulica bidimensional por elementos finitos (TELEMAC-2D) y verificación de campo georreferenciada **Instrumento:** DEM SRTM 30 m y ALOS PALSAR 12.5 m, ArcGIS Pro, HEC-HMS, TELEMAC-2D, QGIS, receptor GPS y ficha de registro de campo, y el estudio hidrológico de la DRTCA (2022)
Problemas específicos	**Objetivos específicos**	**Hipótesis específicas**		
¿Cuáles son las principales características morfométricas de la cuenca del río Pongora y qué relación guardan con su dinámica hidrológica?	Determinar las principales características morfométricas de la cuenca del río Pongora y su influencia en la dinámica hidrológica.	Las características morfométricas de la cuenca del río Pongora influyen directamente en su dinámica hidrológica y comportamiento hidráulico.		
¿Qué condiciones hidráulicas presenta el río Pongora bajo diferentes escenarios de caudal?	Analizar el comportamiento hidráulico del río Pongora bajo diferentes condiciones de caudal representativas.	La modelación numérica con elementos finitos permite representar de forma coherente y consistente el régimen de caudales y el flujo en el río Pongora bajo distintos escenarios de caudales.		
¿Cómo puede implementarse un modelo numérico con elementos finitos que simule de manera adecuada el flujo en el río Pongora?	Implementar un modelo numérico con elementos finitos que simule de manera adecuada el flujo del río Pongora.	La modelación numérica con elementos finitos constituye una herramienta válida para simular el flujo en el río Pongora.		
¿Qué grado de correspondencia existe entre las características morfométricas de la cuenca y los resultados de la modelación numérica del comportamiento hidráulico del río Pongora?	Contrastar las características morfométricas de la cuenca con los resultados de la modelación numérica para verificar su consistencia respecto al comportamiento hidráulico del río Pongora.	Las características morfométricas de la cuenca del río Pongora guardan correspondencia con los resultados de la modelación numérica, de modo que la caracterización física de la cuenca es consistente con el comportamiento hidráulico simulado, sin que ello implique una relación causal demostrada estadísticamente.		
¿Qué implicancias tienen los resultados obtenidos para la gestión del recurso hídrico y la prevención de riesgos en la cuenca del río Pongora?	Proponer lineamientos técnicos que contribuyan a la gestión del recurso hídrico y a la reducción de riesgos asociados al río Pongora.	Los resultados de la evaluación hidráulica permiten plantear lineamientos técnicos útiles para la gestión del recurso hídrico y la prevención de riesgos.		

Nota. Elaboración propia.

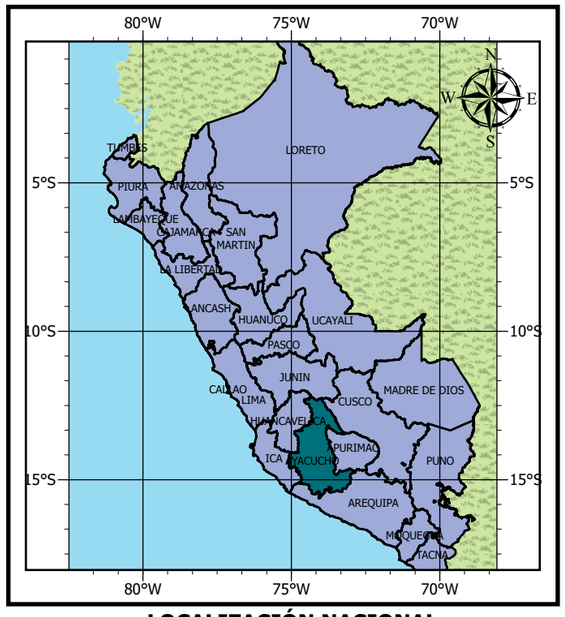
Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables

Cuadro 38

Matriz de operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida
Variable Independiente (X): Análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos	X1: Parámetros morfométricos de forma	Área de la cuenca	km^2
		Perímetro de la cuenca	km
		Coeficiente de compacidad (Gravelius)	Adimensional
		Factor de forma	Adimensional
	X2: Parámetros morfométricos de relieve y red de drenaje	Longitud del cauce principal	km
		Pendiente media del cauce	%
		Densidad de drenaje	km/km^2
		Orden de la red de drenaje (Strahler)	Adimensional
	X3: Modelación numérica con elementos finitos	Caudal de diseño por periodo de retorno	m^3/s
		Coeficiente de rugosidad de Manning	Adimensional
		Resolución de la malla de elementos finitos	Elementos / m
		Balance de masa del modelo	%
Variable Dependiente (Y): Comportamiento hidráulico del río Pongora	Y1: Parámetros hidráulicos del flujo (simulados)	Tirante o profundidad del flujo	m
		Velocidad del flujo	m/s
		Número de Froude	Adimensional
		Cota de la superficie del agua	m s.n.m.
	Y2: Extensión de la inundación (resultado espacial)	Área de inundación	ha
		Ancho de la mancha de inundación	m
		Longitud del tramo inundado	km
		Profundidad máxima de inundación	m
	Y3: Peligrosidad por inundación (resultado final)	Nivel de peligro por inundación	Bajo/medio/alto
		Zonas críticas de máxima peligrosidad verificadas en campo	Número
		Áreas de cultivo expuestas	ha
		Viviendas o infraestructura expuestas	Número

Nota. Elaboración propia.



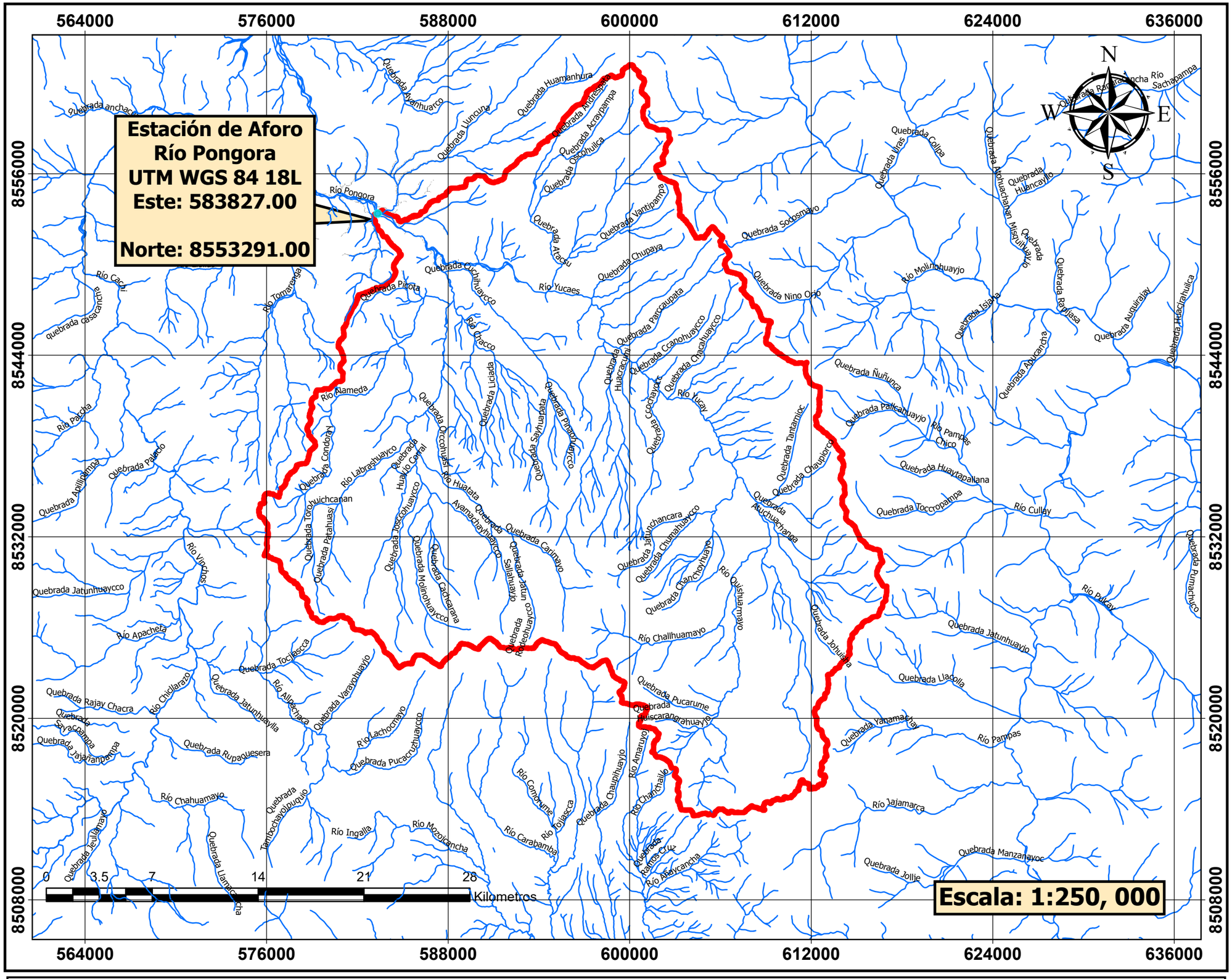
LOCALIZACIÓN NACIONAL

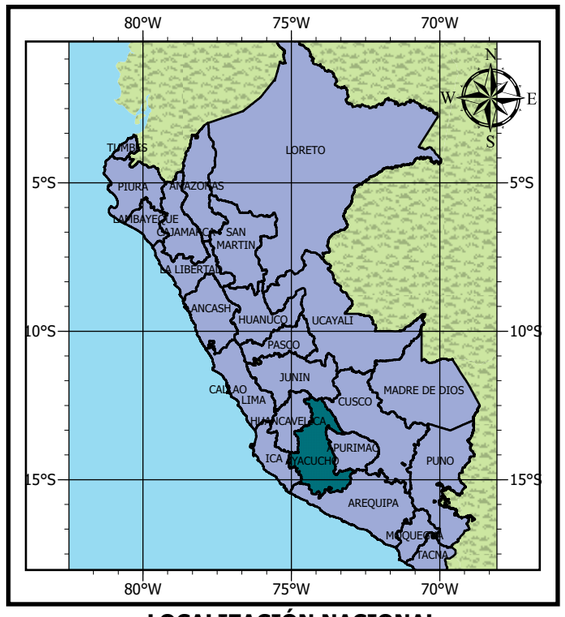


LOCALIZACIÓN REGIONAL

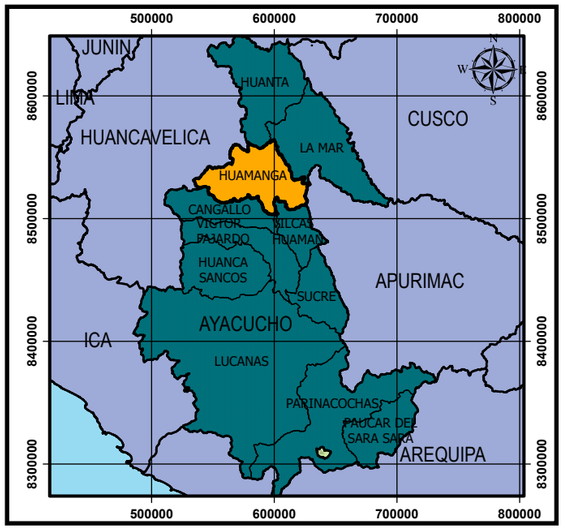


LOCALIZACIÓN DISTRITAL


564000
576000
588000
600000
612000
624000
636000
8556000
8544000
8532000
8520000
8508000
Estación de Aforo
Río Pongora
UTM WGS 84 18L
Este: 583827.00
Norte: 8553291.00
Río Pongora
Río Cachi
Río Tomarenda
Río Alameda
Río Patcha
Río Vinchos
Río Apacheta
Río Chiclarazo
Río Chahuamayo
Río Ingalle
Río Mozoloancha
Río Lachocmayo
Río Chaco
Río Yucaes
Río Yucay
Río Pampas Chico
Río Molinohuayjo
Río Cullay
Río Pulcay
Río Pampas
Río Tajamarca
Río Challhuamayo
Río Quishuarmayo
Río Amaruyoj
Río Charchallo
Río Ahaycancha
Río Huatata
Río Labrashuayco
Río Lacharcancha
Río Toqlasca
Río Carabamba
Río Contonume
Río Sallahuayjo
Río Ayamachayhuayco
Río Jatunchancara
Río Chumahuaycco
Río Molinohuayccco
Río Jatun Huaycco
Río Huaycco
Río Huacracuni
Río Cochayoc
Río Huancaylio
Río Huancaylio Misquihuayjo
Río Ccanohuaycco
Río Cchacahuaycco
Río Parccaupata
Río Sayhuarata
Río Pinaypampa
Río Ccochuhuaycco
Río Huaycco
Río Joscohuaycco
Río Allpachaca
Río Lachocmayo
Río Pucacruzhuaycco
Río Chaupihuayjo
Río Amaruyoj
Río Charchallo
Río Ahaycancha
Río Pucarume
Río Huiscarangahuayjo
Río Yanamachay
Río Pampas
Río Tajamarca
Río Pulcay
Río Cullay
Río Quishuarmayo
Río Huancaylio
Río Huancaylio Misquihuayjo
Río Molinohuayjo



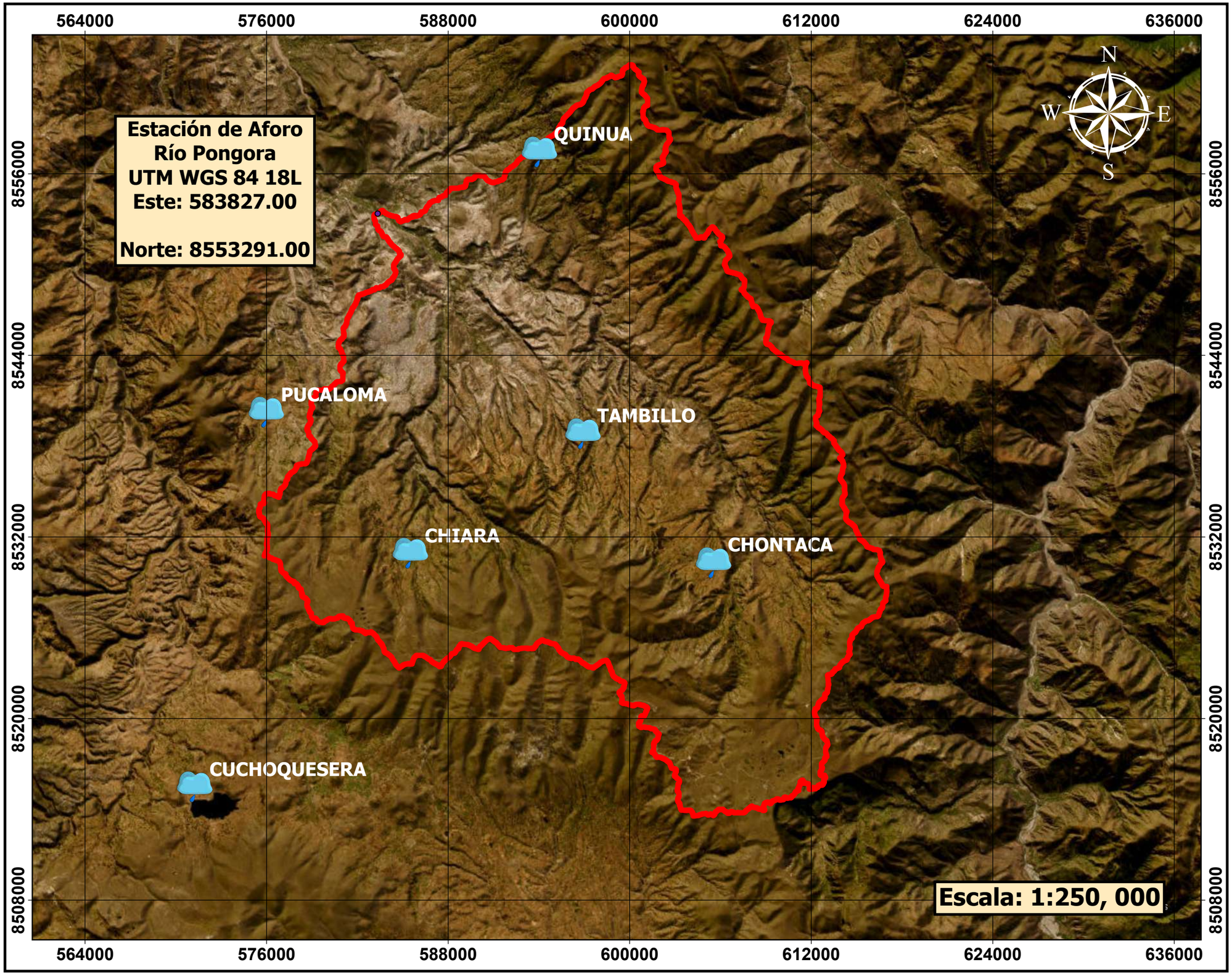
LOCALIZACIÓN NACIONAL



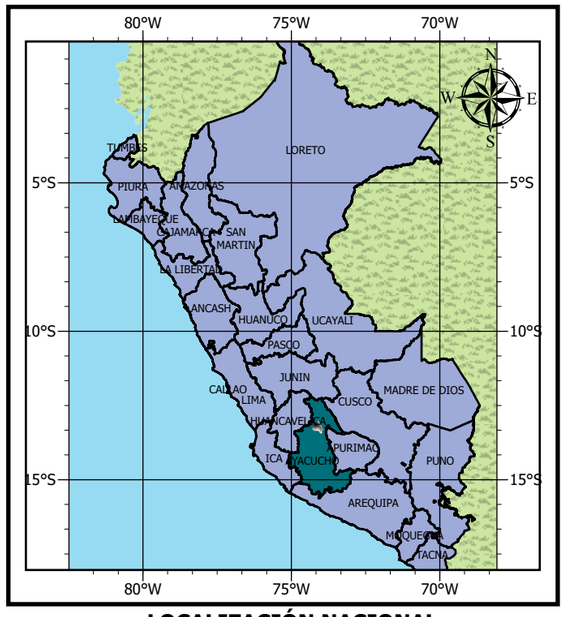
LOCALIZACIÓN REGIONAL



LOCALIZACIÓN DISTRITAL



	PROYECTO: MAPA DE UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEREOLÓGICAS		**PROYECTO:** "Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."	DISEÑO: Bach. J.E.C REVISA: Ing. A.S.I.H ESCALA: INDICADA FECHA: Set-26	N° DE PLANO: N - 02 / FIRMA
	DEPARTAMENTO: AYACUCHO	PROVINCIA: HUAMANGA			
	DISTRITO: VARIOS	LOCALIDAD: RIO PONGORA			



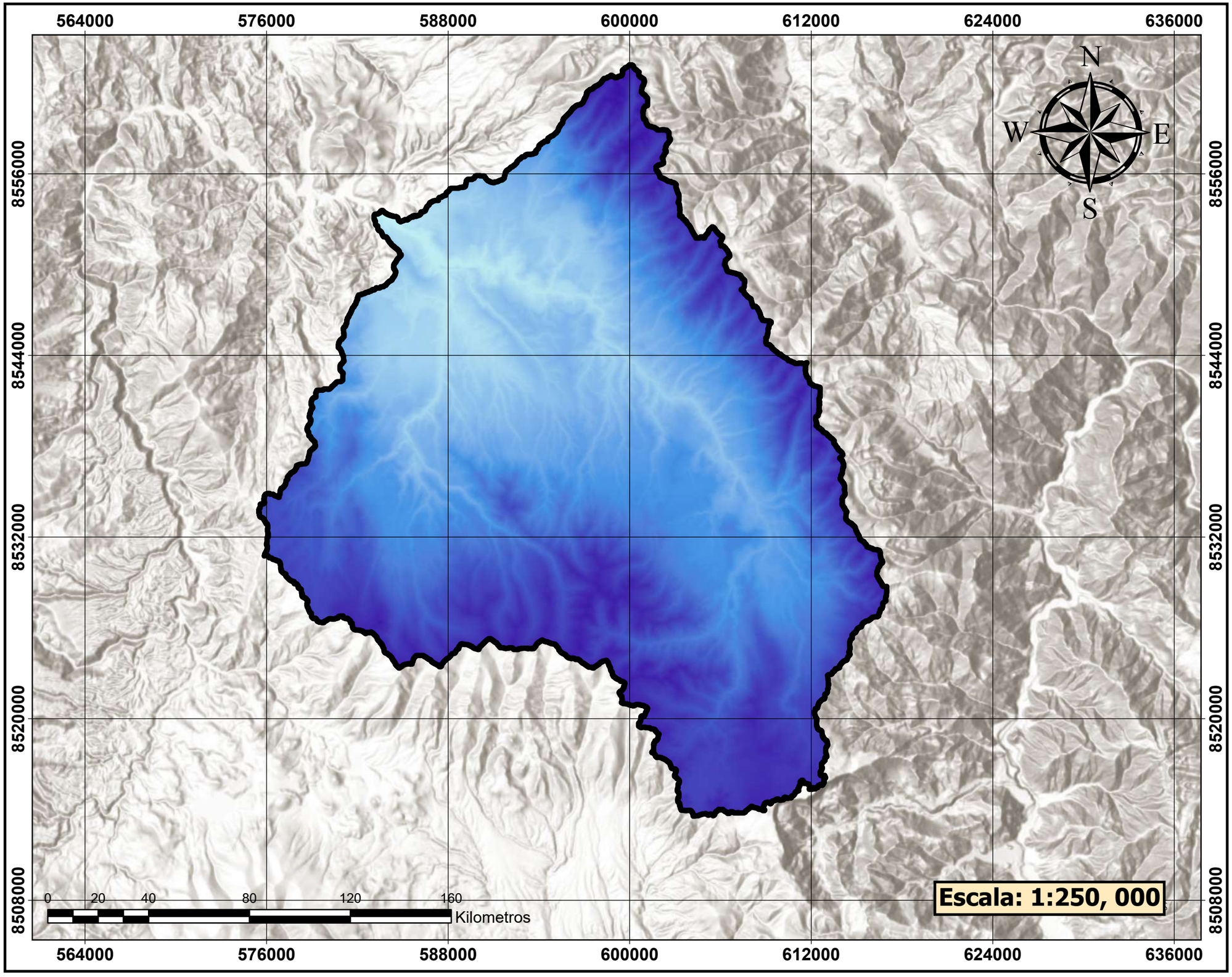
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL

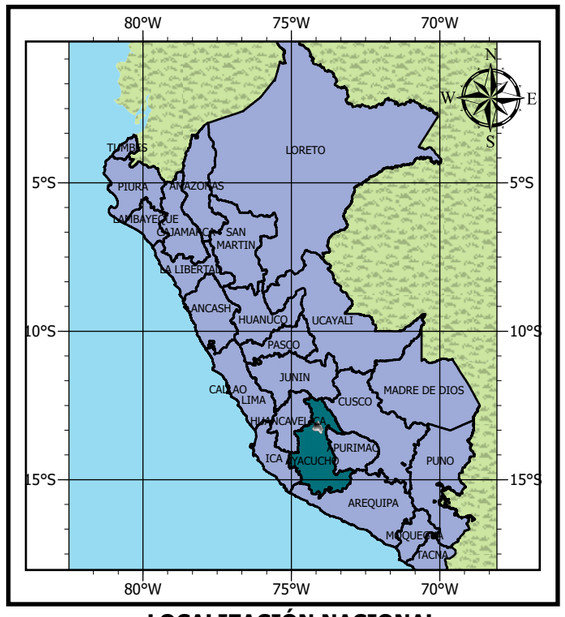


LOCALIZACIÓN DISTRITAL

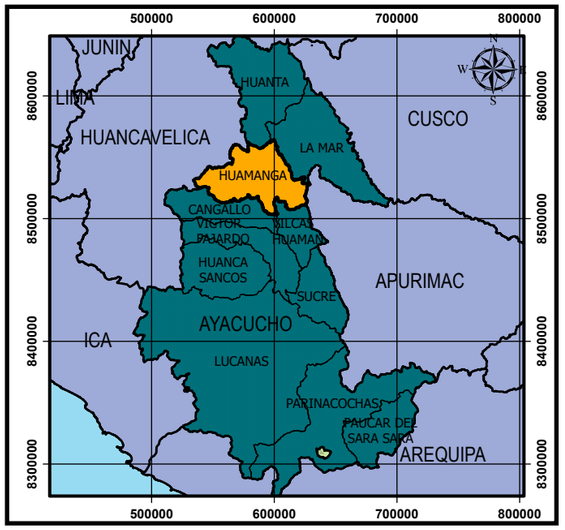


INGENIERIA CIVIL UNSCH	**PROYECTO:** Mapa del Modelo Digital de Elevación (MDE) de la Cuenca Hidrográfica del Río Pongora DEPARTAMENTO: AYACUCHO / PROVINCIA: HUAMANGA DISTRITO: VARIOS / LOCALIDAD: RIO PONGORA	**PROYECTO:** "Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."	DISEÑO: Bach. J.E.C REVISA: Ing. A.S.I.H ESCALA: INDICADA FECHA: Set-26	N° DE PLANO: **N - 03**	FIRMA

MAPA DE PENDIENTES DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA PONGORA



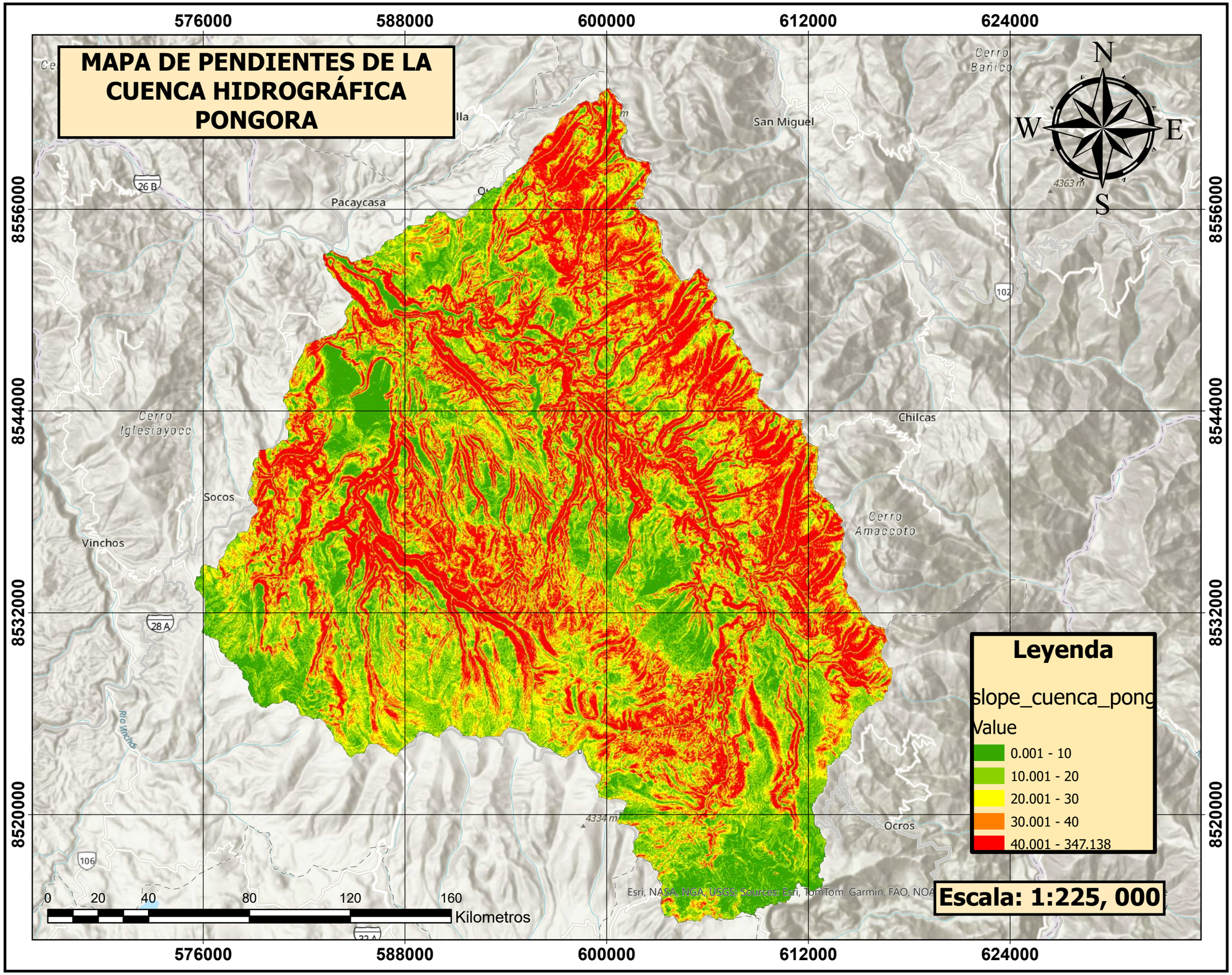
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL



LOCALIZACIÓN DISTRITAL

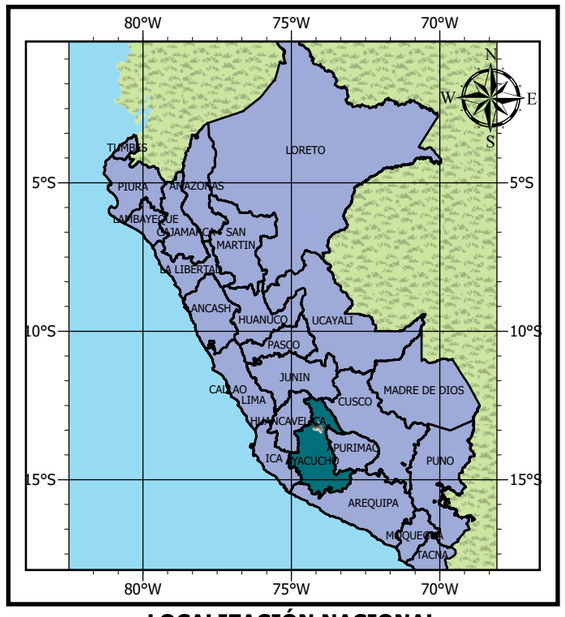


PROYECTO: Mapa de Pendientes de la Cuenca Hidrográfica del Río Pongora			
DEPARTAMENTO: AYACUCHO	**PROVINCIA:** HUAMANGA		
DISTRITO: VARIOS	**LOCALIDAD:** RIO PONGORA		

PROYECTO:
"Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."

DISEÑO	N° DE PLANO	FIRMA
Bach. J.E.C REVISA Ing. A.S.I.H ESCALA INDICADA FECHA: Set-26	N - 04	

MAPA DE RED HÍDRICA Y ORDEN STRAHLER CUENCA RÍO PONGORA



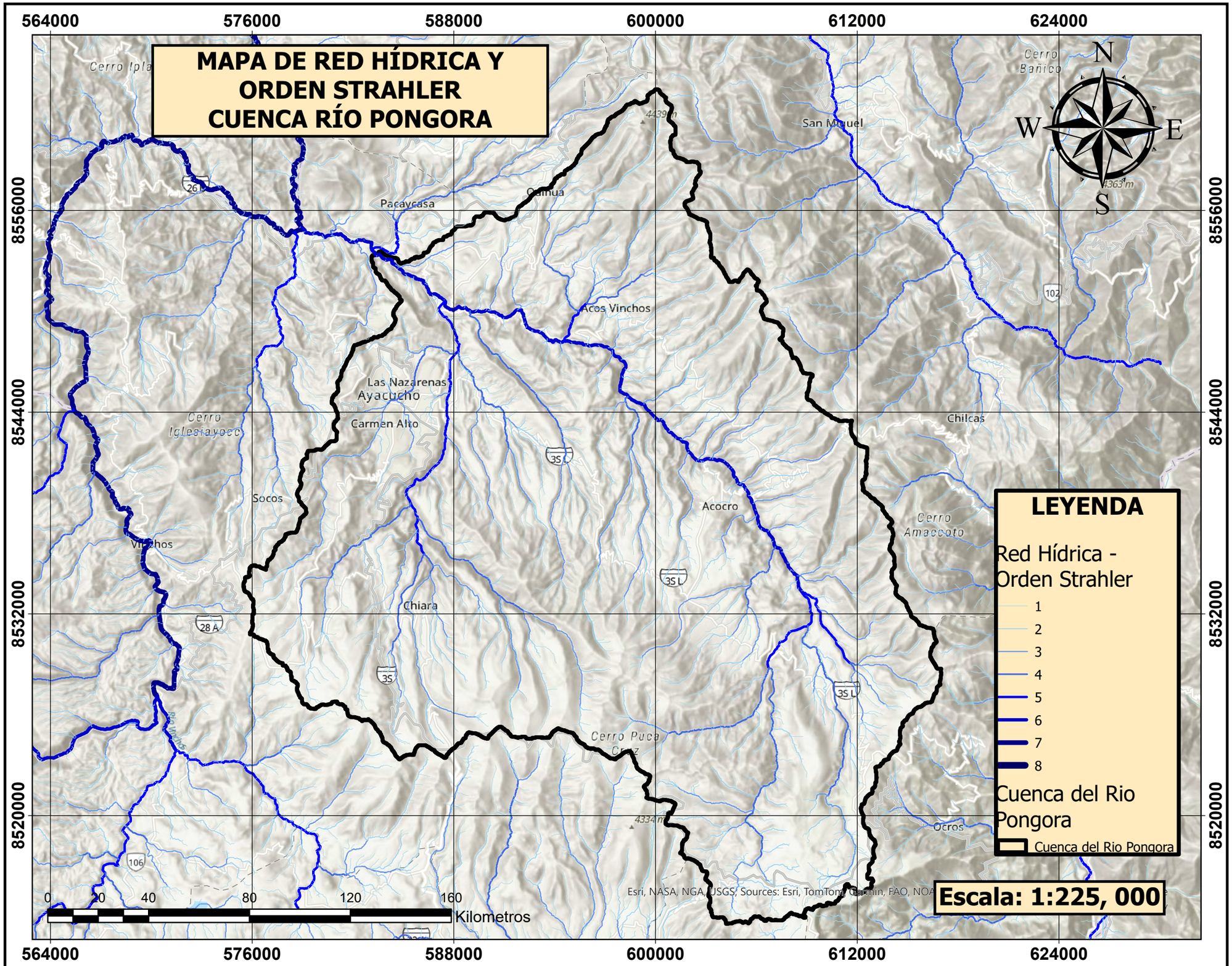
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL



LOCALIZACIÓN DISTRITAL



INGENIERIA CIVIL UNSCH

PROYECTO:

MAPA DE RED HÍDRICA Y ORDEN DE STRAHLER — CUENCA DEL RÍO PONGORA

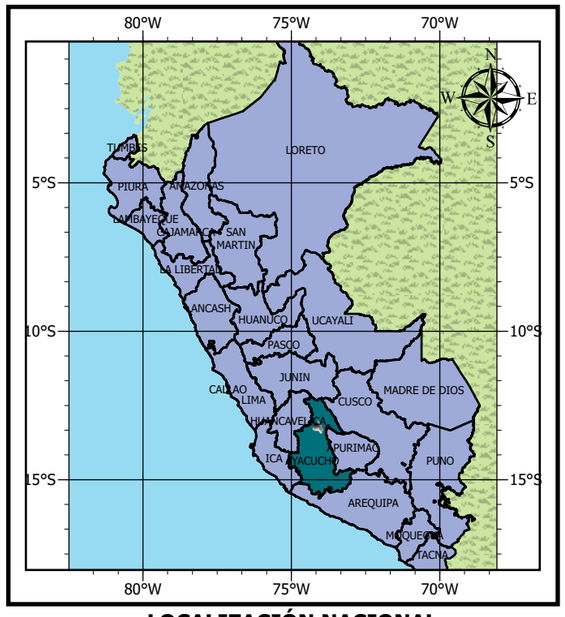
DEPARTAMENTO:	PROVINCIA:
AYACUCHO	HUAMANGA
DISTRITO:	LOCALIDAD:
VARIOS	RIO PONGORA

PROYECTO:

"Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."

DISEÑO	N° DE PLANO	FIRMA
Bach. J.E.C	N - 05	
REVISA		
Ing. A.S.I.H		
ESCALA		
INDICADA		
FECHA:		
Set-26		

MAPA DE COBERTURA VEGETAL CUENCA DEL RÍO PONGORA



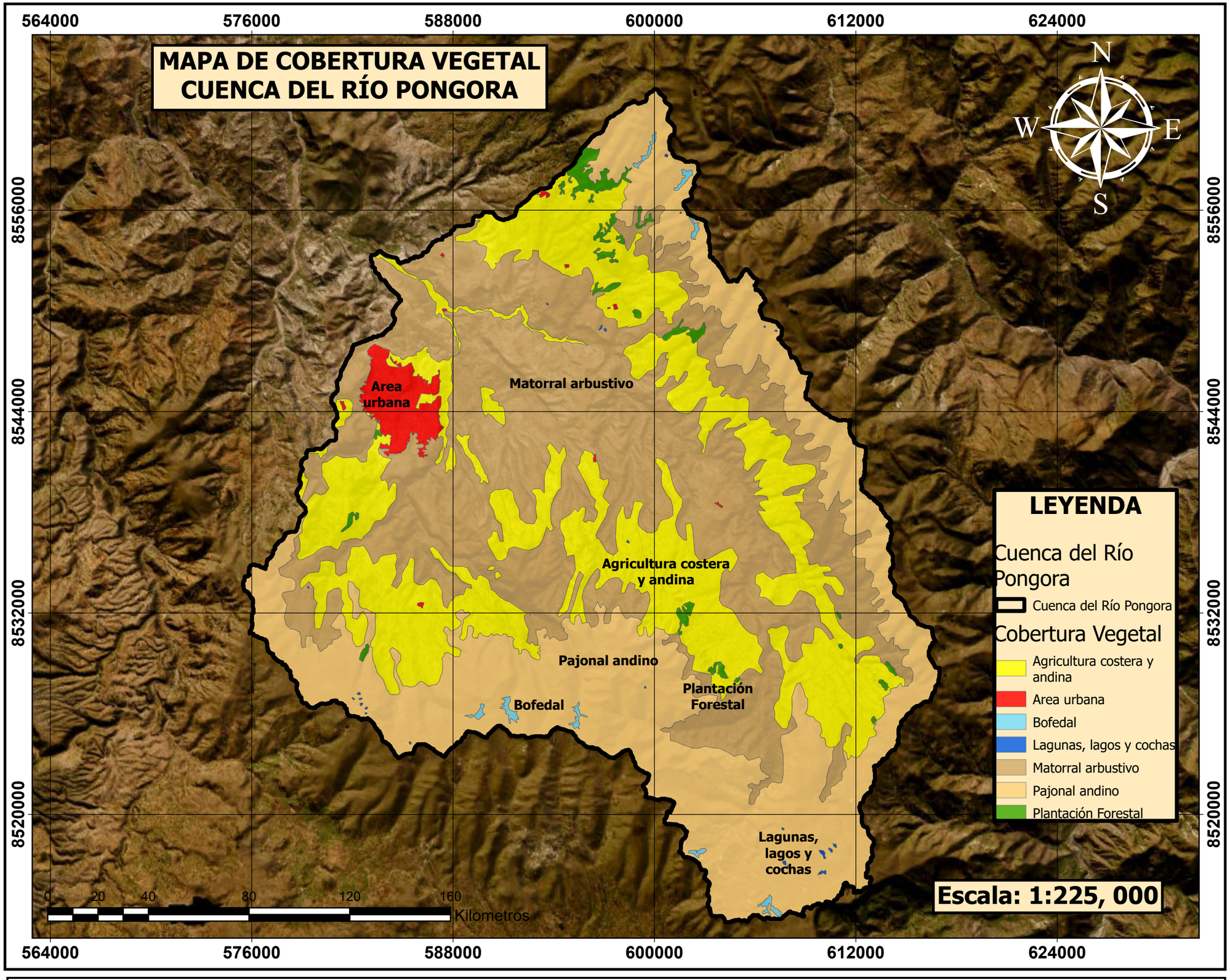
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL



LOCALIZACIÓN DISTRITAL



LEYENDA

Cuenca del Río Pongora

Cuenca del Río Pongora

Cobertura Vegetal

- Agricultura costera y andina
- Area urbana
- Bofedal
- Lagunas, lagos y cochas
- Matorral arbustivo
- Pajonal andino
- Plantación Forestal

PROYECTO:

Mapa de Cobertura Vegetal Cuenca del Río Pongora

DEPARTAMENTO:	PROVINCIA:
AYACUCHO	HUAMANGA
DISTRITO:	LOCALIDAD:
VARIOS	RIO PONGORA

PROYECTO:

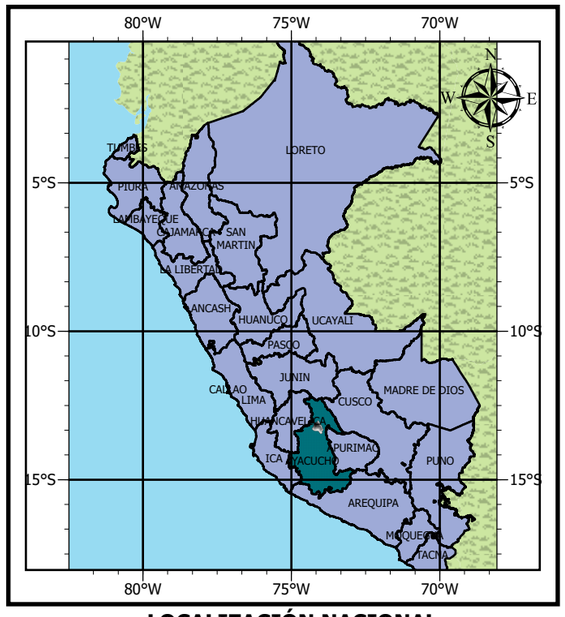
"Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."

DISEÑO
Bach. J.E.C
REVISA
Ing. A.S.I.H
ESCALA
INDICADA
FECHA:
Set-26

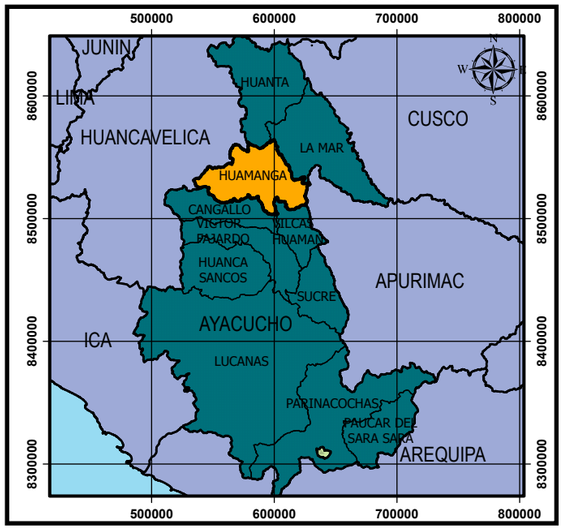
N° DE PLANO

N - 06

FIRMA



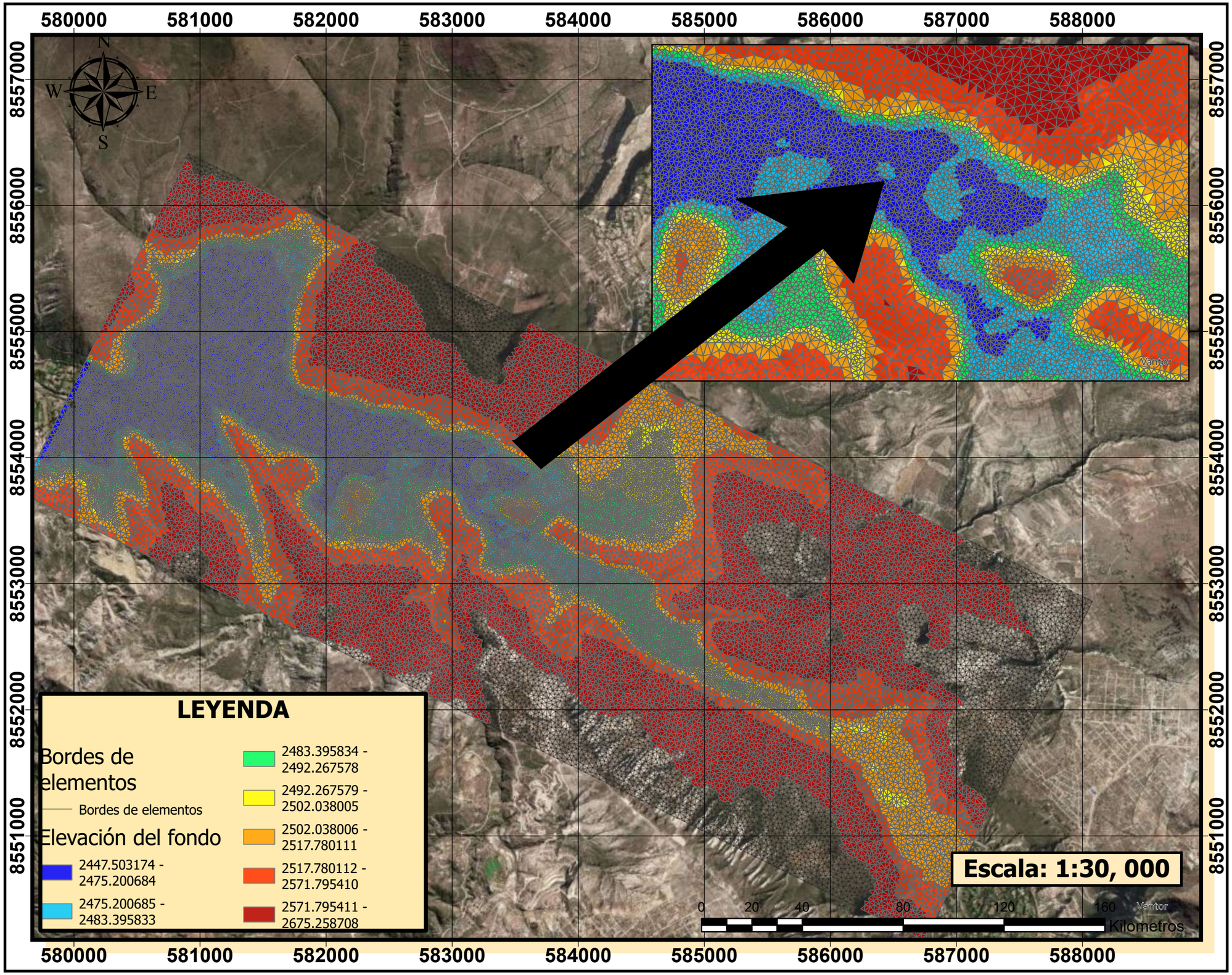
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL



LOCALIZACIÓN DISTRITAL



PROYECTO: SCRETIZACIÓN DEL DOMINIO DE CÁLCULO — RÍO PONGORA		
DEPARTAMENTO: AYACUCHO	**PROVINCIA:** HUAMANGA	
DISTRITO: VARIOS	**LOCALIDAD:** RIO PONGORA	

PROYECTO:

"Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."

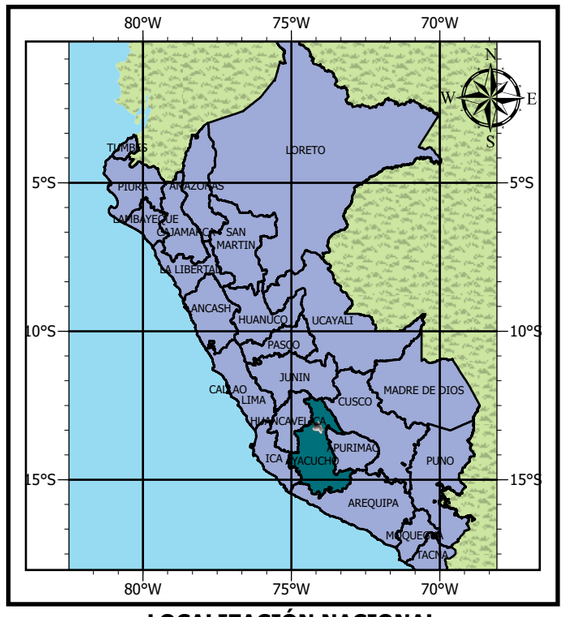
DISEÑO
Bach. J.E.C
REVISA
Ing. A.S.I.H
ESCALA
INDICADA
FECHA:
Set-26

N° DE PLANO

N - 07

FIRMA

MAPA DE TIRANTES DE INUNDACIÓN Tr=140 AÑOS RÍO PONGORA



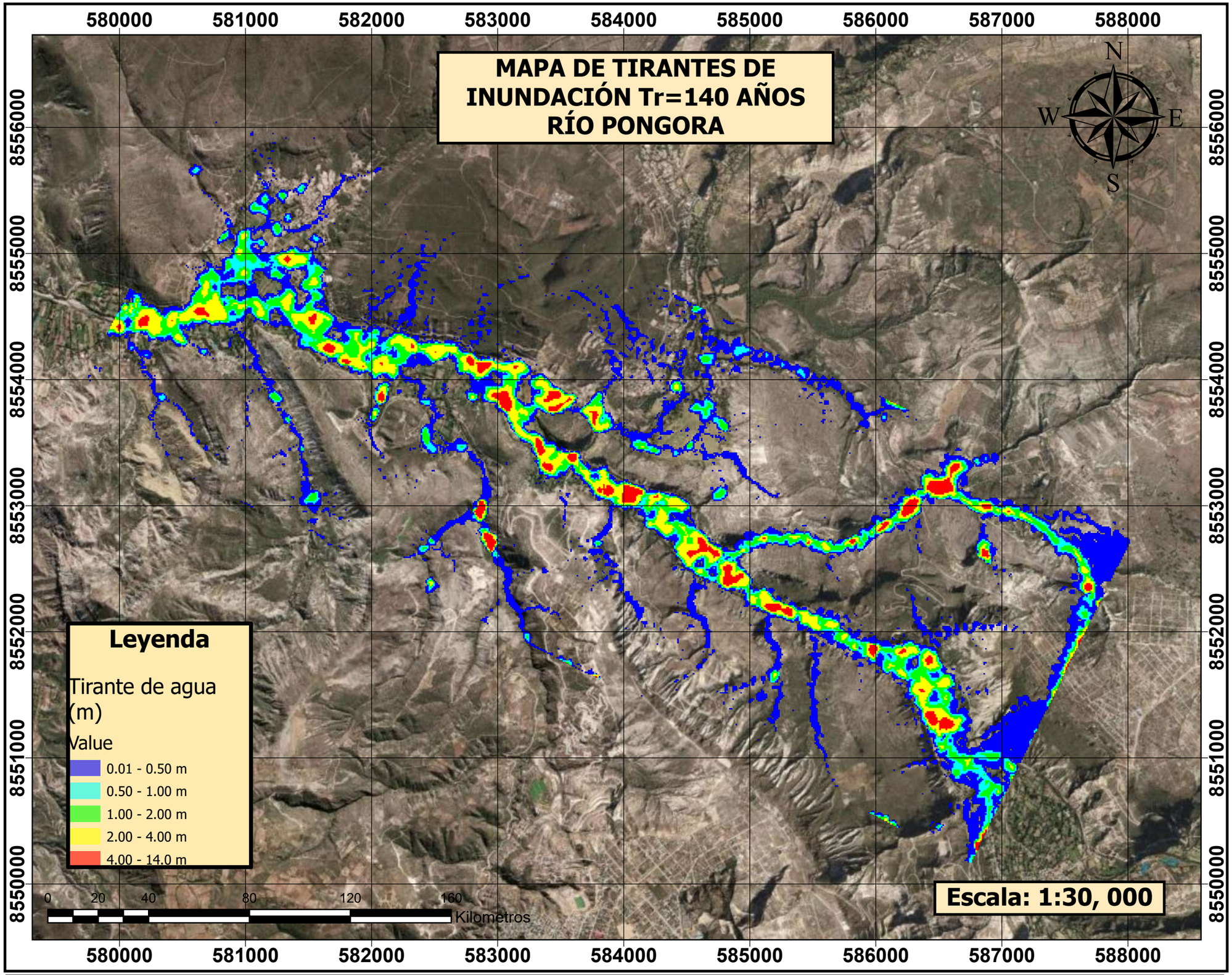
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL

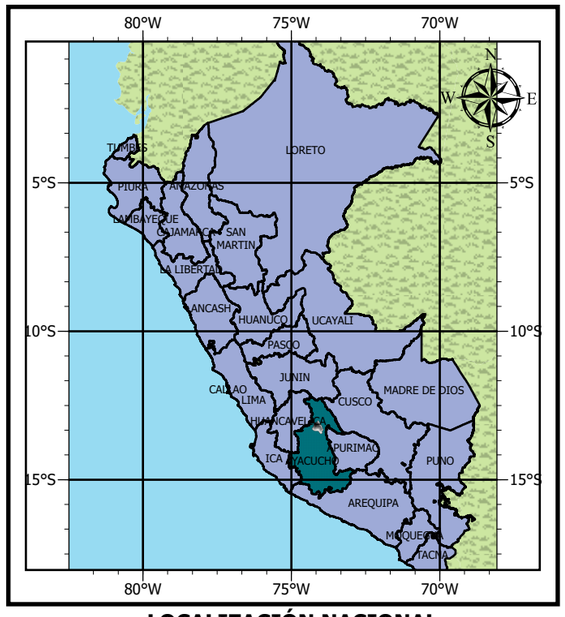


LOCALIZACIÓN DISTRITAL



INGENIERIA CIVIL UNSCH	**PROYECTO:** Mapa de Tirantes de Inundación Tr=140 años Rió Pongora (Q=444.10 m³/s)	PROYECTO: "Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."	DISEÑO Bach. J.E.C REVISA Ing. A.S.I.H ESCALA INDICADA FECHA: Set-26	N° DE PLANO **N - 08**	FIRMA
	DEPARTAMENTO: AYACUCHO / PROVINCIA: HUAMANGA				
	DISTRITO: VARIOS / LOCALIDAD: RIO PONGORA				

MAPA DE TIRANTES DE INUNDACIÓN Tr=25 AÑOS RÍO PONGORA



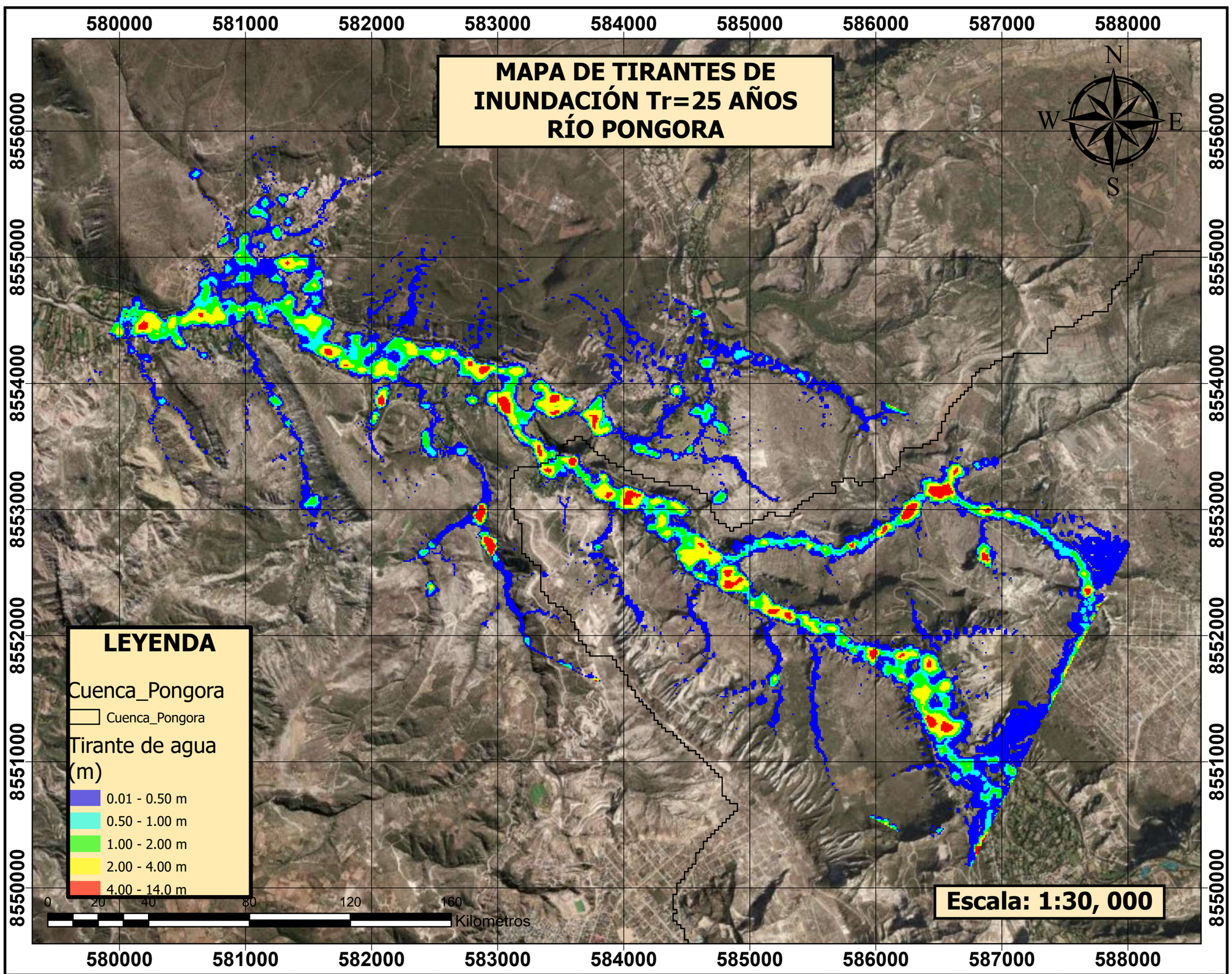
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL



LOCALIZACIÓN DISTRITAL



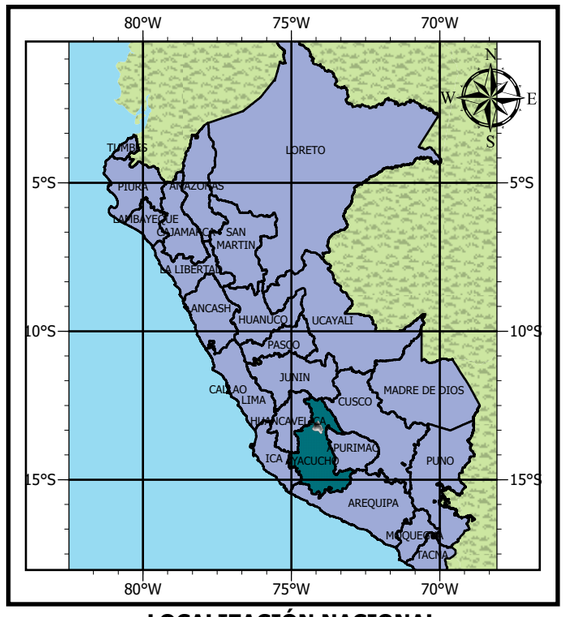
PROYECTO: Mapa de Tirantes de Inundación Tr=25 años Río Pongora (Q=192.74 m³/s)			
DEPARTAMENTO: AYACUCHO	**PROVINCIA:** HUAMANGA		
DISTRITO: VARIOS	**LOCALIDAD:** RIO PONGORA		

PROYECTO:
"Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."

DISEÑO
Bach. J.E.C
REVISA
Ing. A.S.I.H
ESCALA
INDICADA
FECHA:
Set-26

N° DE PLANO	FIRMA
N - 09	

MAPA DE TIRANTES DE INUNDACIÓN Tr=50 AÑOS RÍO PONGORA



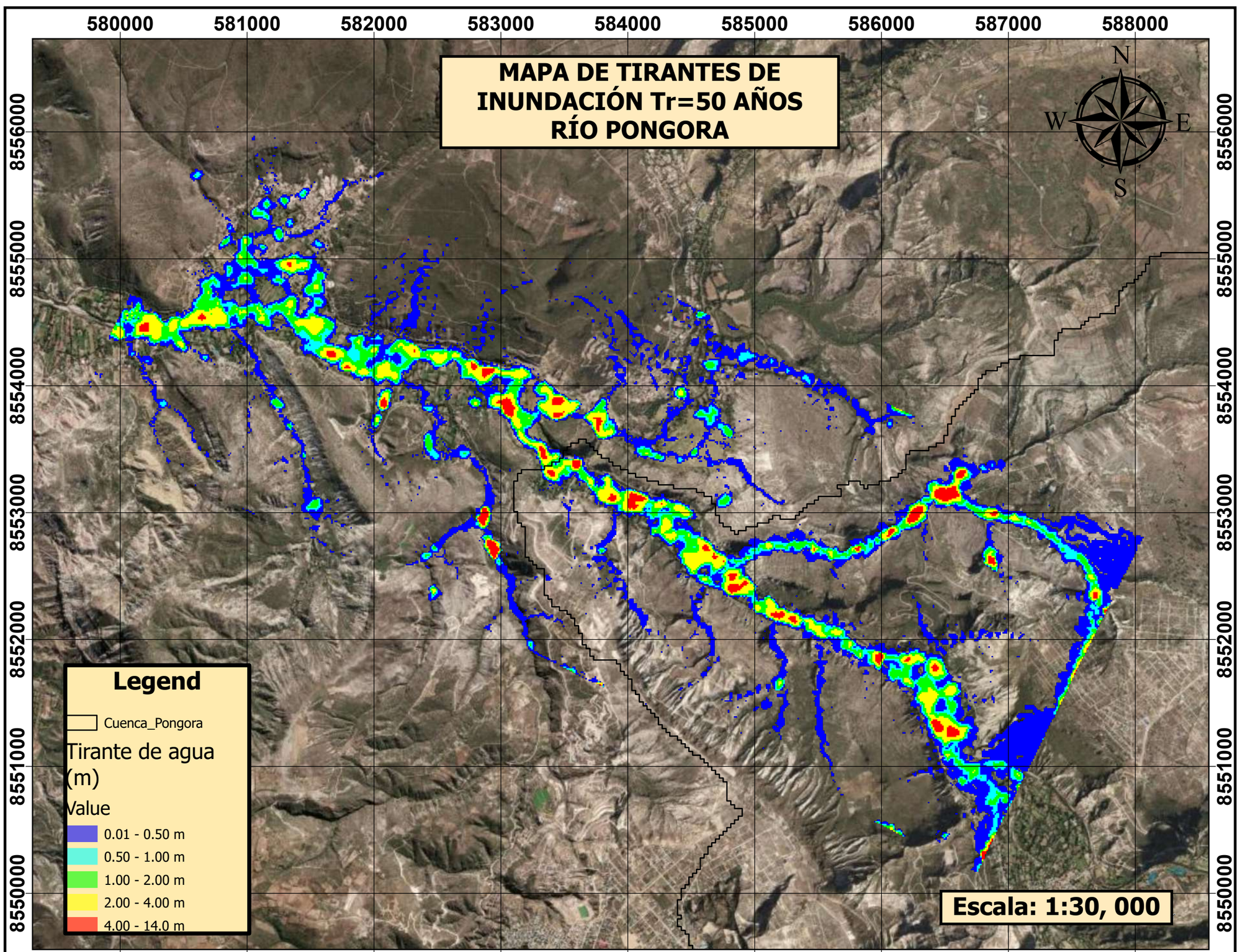
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL



LOCALIZACIÓN DISTRITAL



PROYECTO:

Mapa de Tirantes de Inundación Tr=50 años Río Pongora (Q=267.28 m³/s)

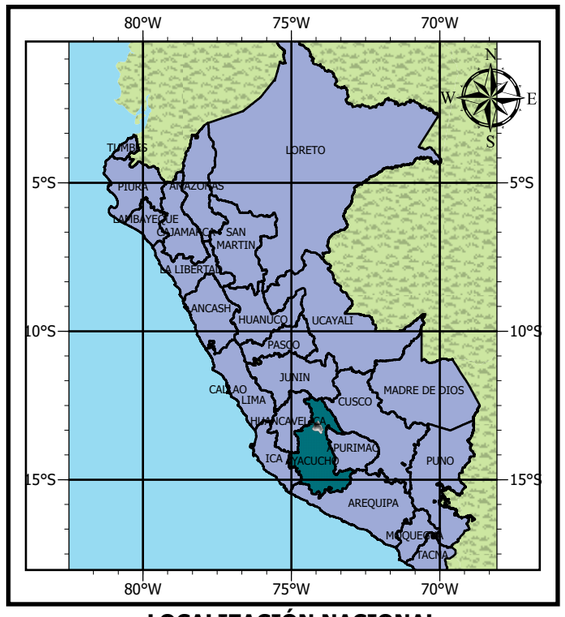
DEPARTAMENTO:	PROVINCIA:
AYACUCHO	HUAMANGA
DISTRITO:	LOCALIDAD:
VARIOS	RIO PONGORA

PROYECTO:

"Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."

DISEÑO	N° DE PLANO	FIRMA
Bach. J.E.C	N - 10	
REVISA		
Ing. A.S.I.H		
ESCALA		
INDICADA		
FECHA:		
Set-26		

MAPA DE TIRANTES DE INUNDACIÓN Tr=100 AÑOS RÍO PONGORA



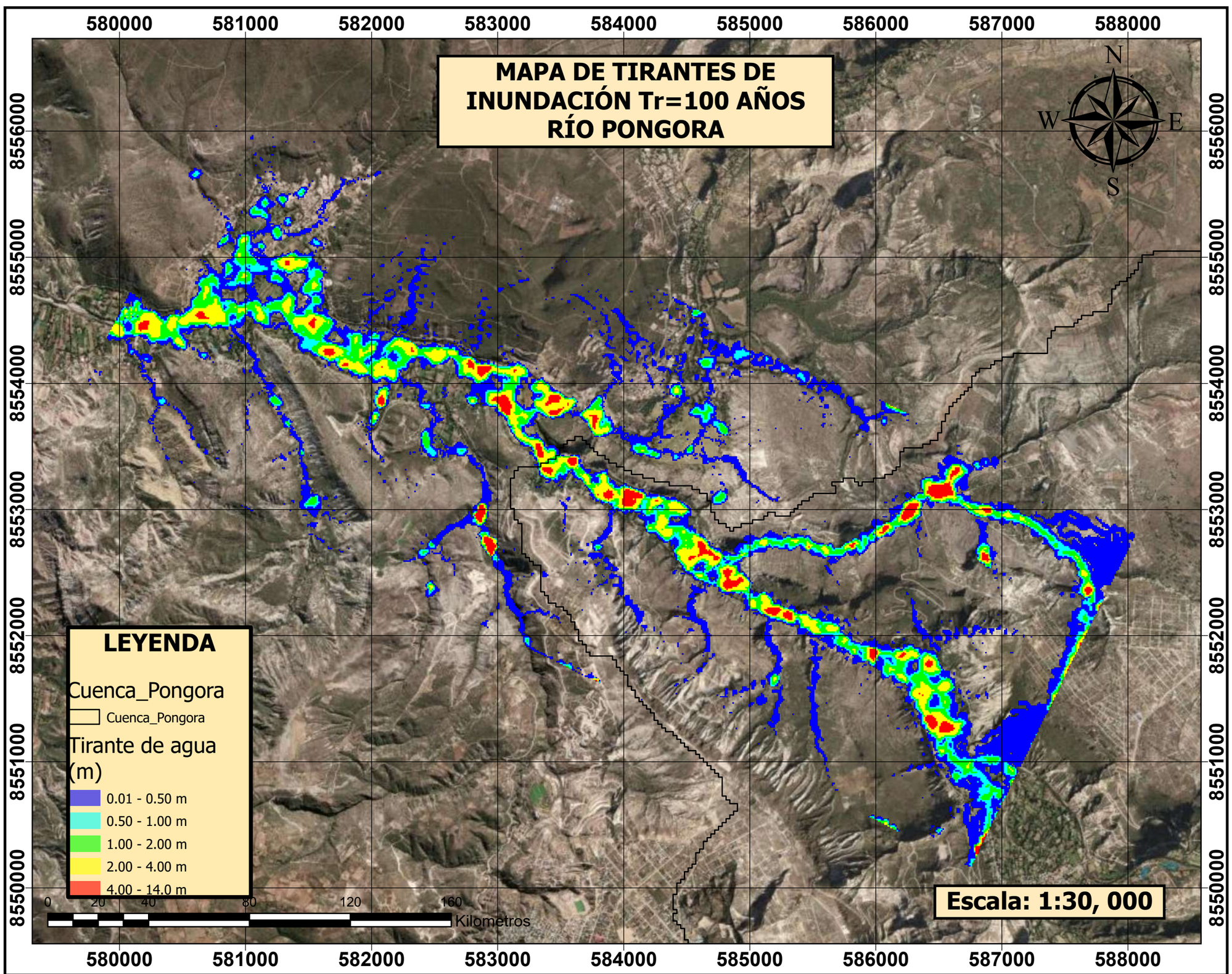
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL

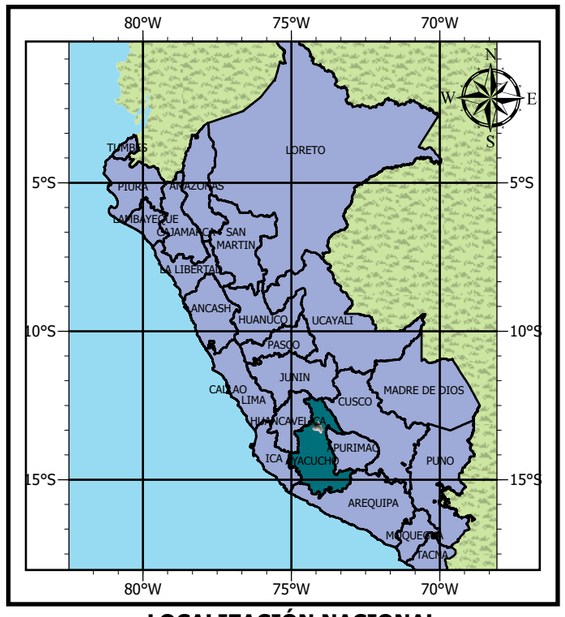


LOCALIZACIÓN DISTRITAL



PROYECTO: Mapa de Tirantes de Inundación Tr=100 años Río Pongora (Q=360.91 m³/s)		**PROYECTO:** "Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."	DISEÑO: Bach. J.E.C REVISA: Ing. A.S.I.H ESCALA: INDICADA FECHA: Set-26	N° DE PLANO: **N - 11**
DEPARTAMENTO: AYACUCHO	PROVINCIA: HUAMANGA			FIRMA
DISTRITO: VARIOS	LOCALIDAD: RIO PONGORA			

MAPA DE TIRANTES DE INUNDACIÓN Tr=200 AÑOS RÍO PONGORA



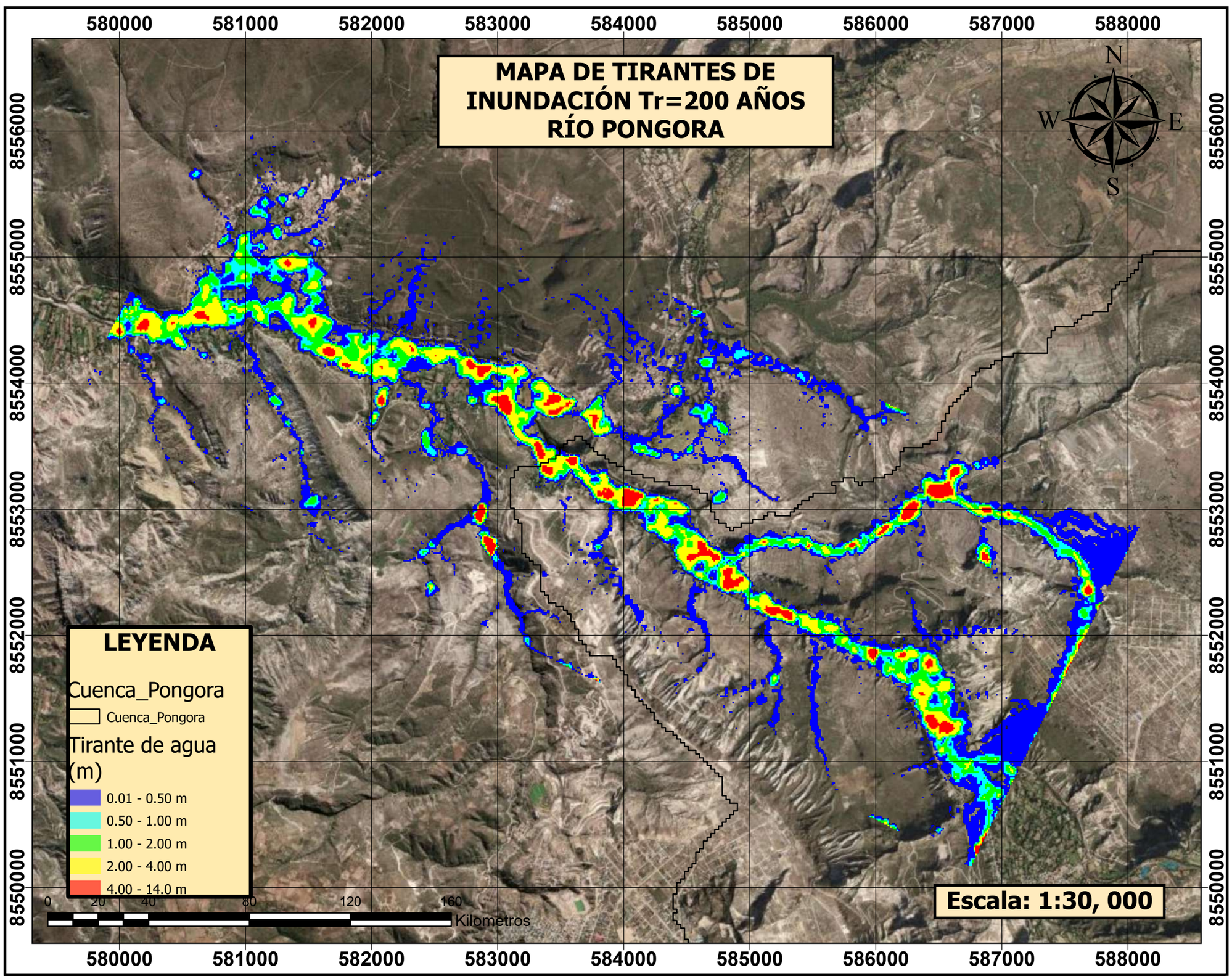
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL

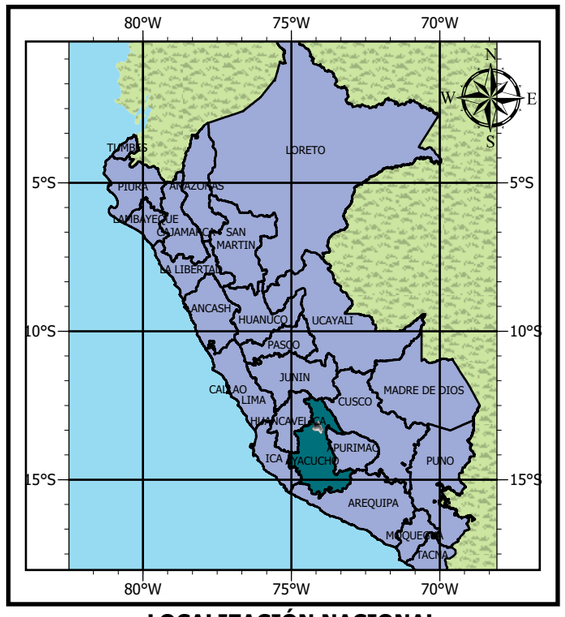


LOCALIZACIÓN DISTRITAL

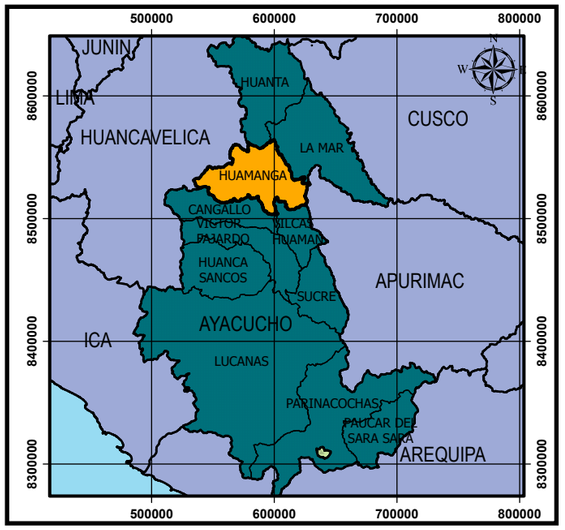


PROYECTO: Mapa de Tirantes de Inundación Tr=200 años Río Pongora (Q=476.64 m³/s)		**PROYECTO:** "Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."	**DISEÑO** Bach. J.E.C **REVISA** Ing. A.S.I.H **ESCALA** INDICADA **FECHA:** Set-26	**N° DE PLANO**	**FIRMA**
DEPARTAMENTO: AYACUCHO	**PROVINCIA:** HUAMANGA			**N - 12**	
DISTRITO: VARIOS	**LOCALIDAD:** RIO PONGORA				

MAPA DE TIRANTES DE INUNDACIÓN Tr=500 AÑOS RÍO PONGORA



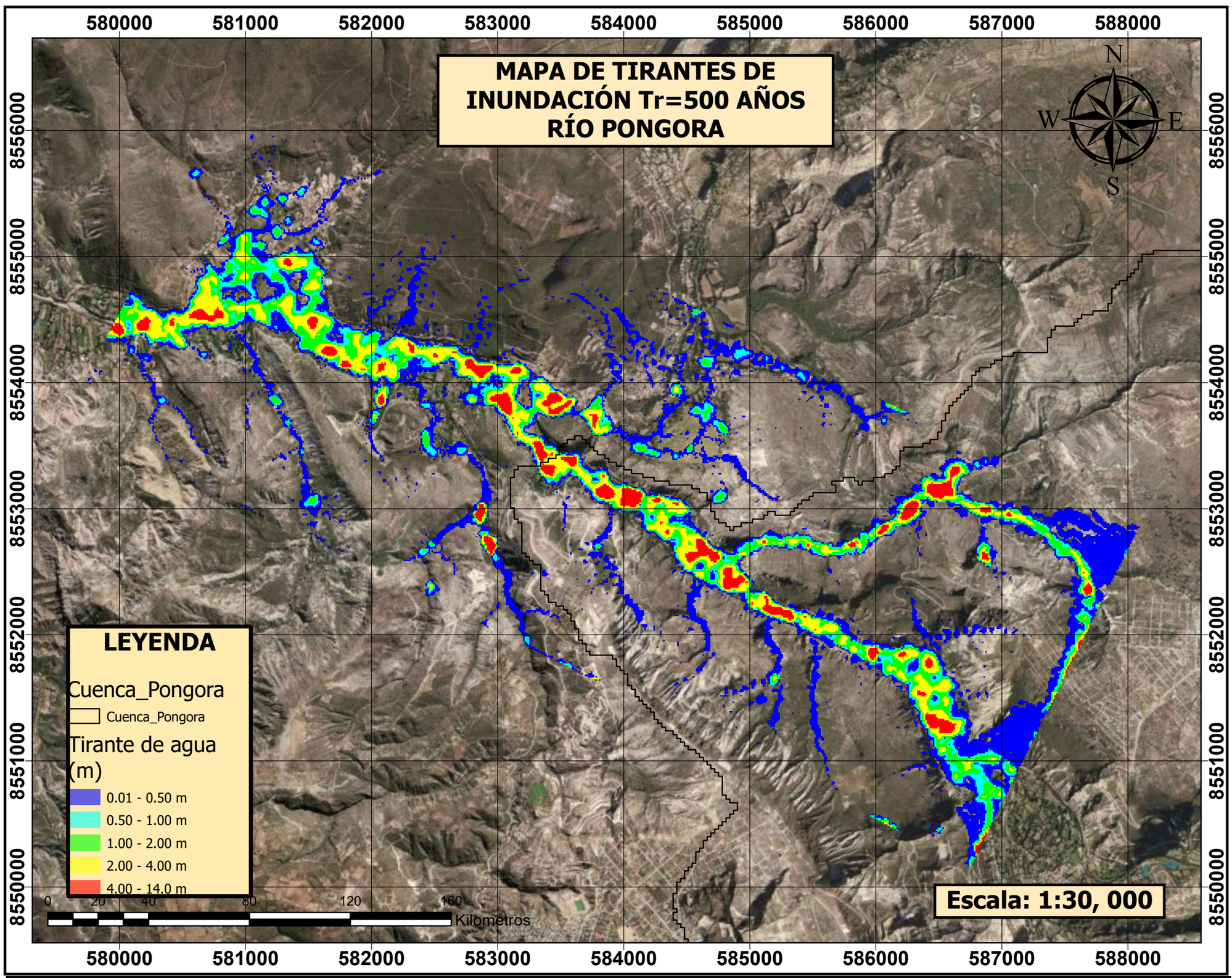
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL



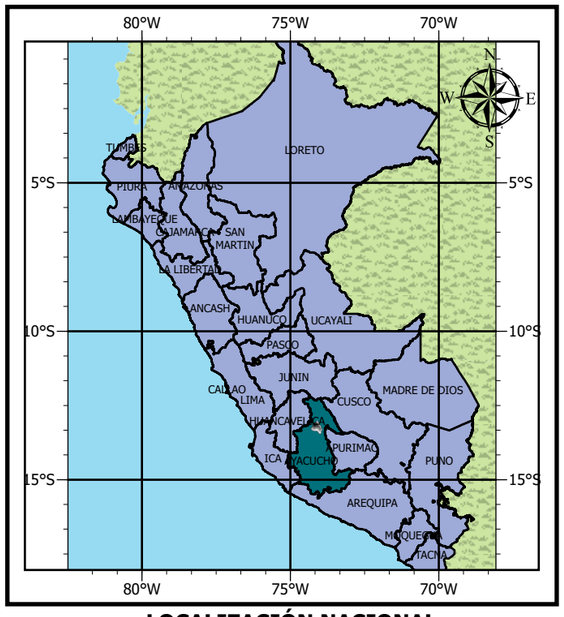
LOCALIZACIÓN DISTRITAL



PROYECTO: Mapa de Tirantes de Inundación Tr=500 años Río Pongora (Q=753.40 m³/s)		PROYECTO: "Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."	DISEÑO: Bach. J.E.C REVISA: Ing. A.S.I.H ESCALA: INDICADA FECHA: Set-26
DEPARTAMENTO: AYACUCHO	PROVINCIA: HUAMANGA		
DISTRITO: VARIOS	LOCALIDAD: RIO PONGORA		

N° DE PLANO	FIRMA
N - 13	

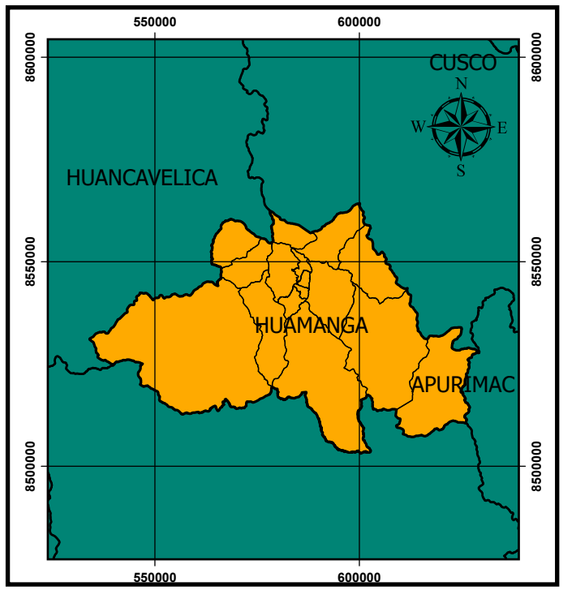
MAPA DE VELOCIDADES DE FLUJO Tr=500 AÑOS RÍO PONGORA



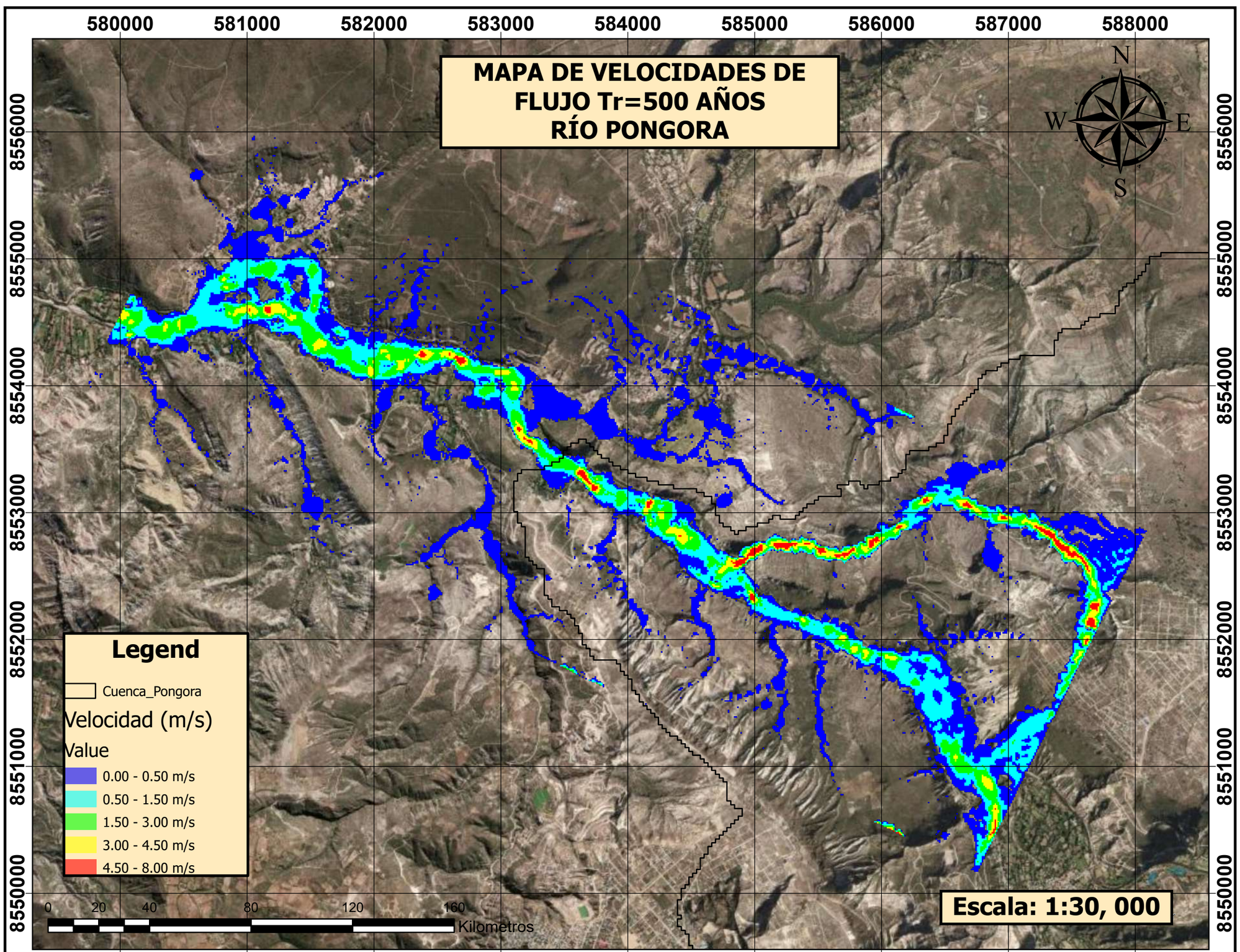
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL

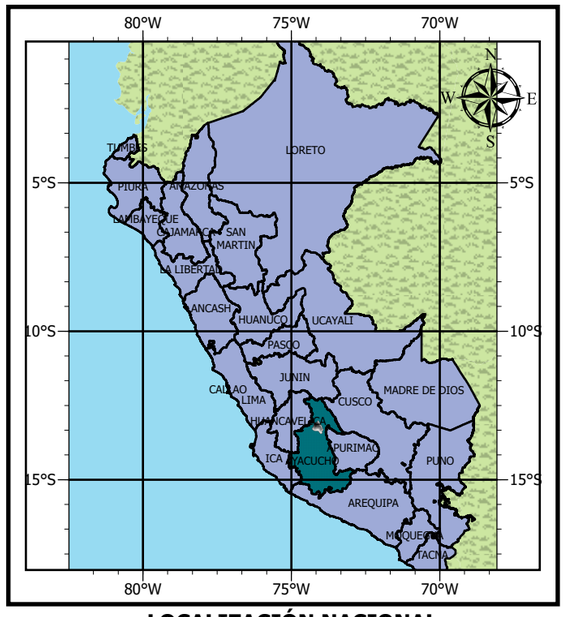


LOCALIZACIÓN DISTRITAL

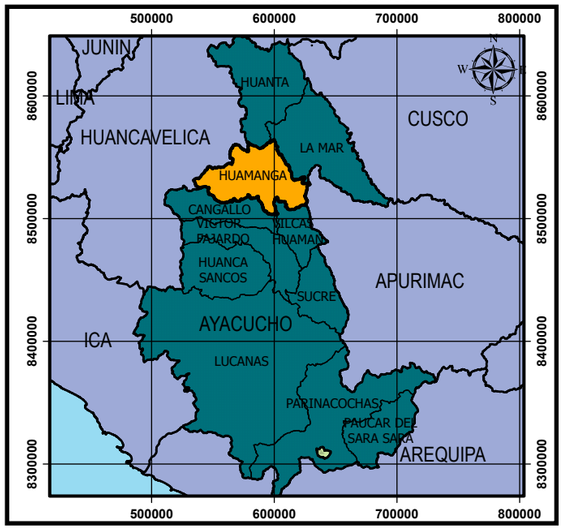


	PROYECTO: Mapa de Velocidades de Flujo Tr=500 años Río Pongora (Q=753.40 m³/s)		**PROYECTO:** "Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."	DISEÑO: Bach. J.E.C REVISA: Ing. A.S.I.H ESCALA: INDICADA FECHA: Set-26	N° DE PLANO: N - 14 / FIRMA
	DEPARTAMENTO: AYACUCHO	PROVINCIA: HUAMANGA			
	DISTRITO: VARIOS	LOCALIDAD: RIO PONGORA			

MAPA DE NÚMERO DE FROUDE Tr=500 AÑOS RÍO PONGORA



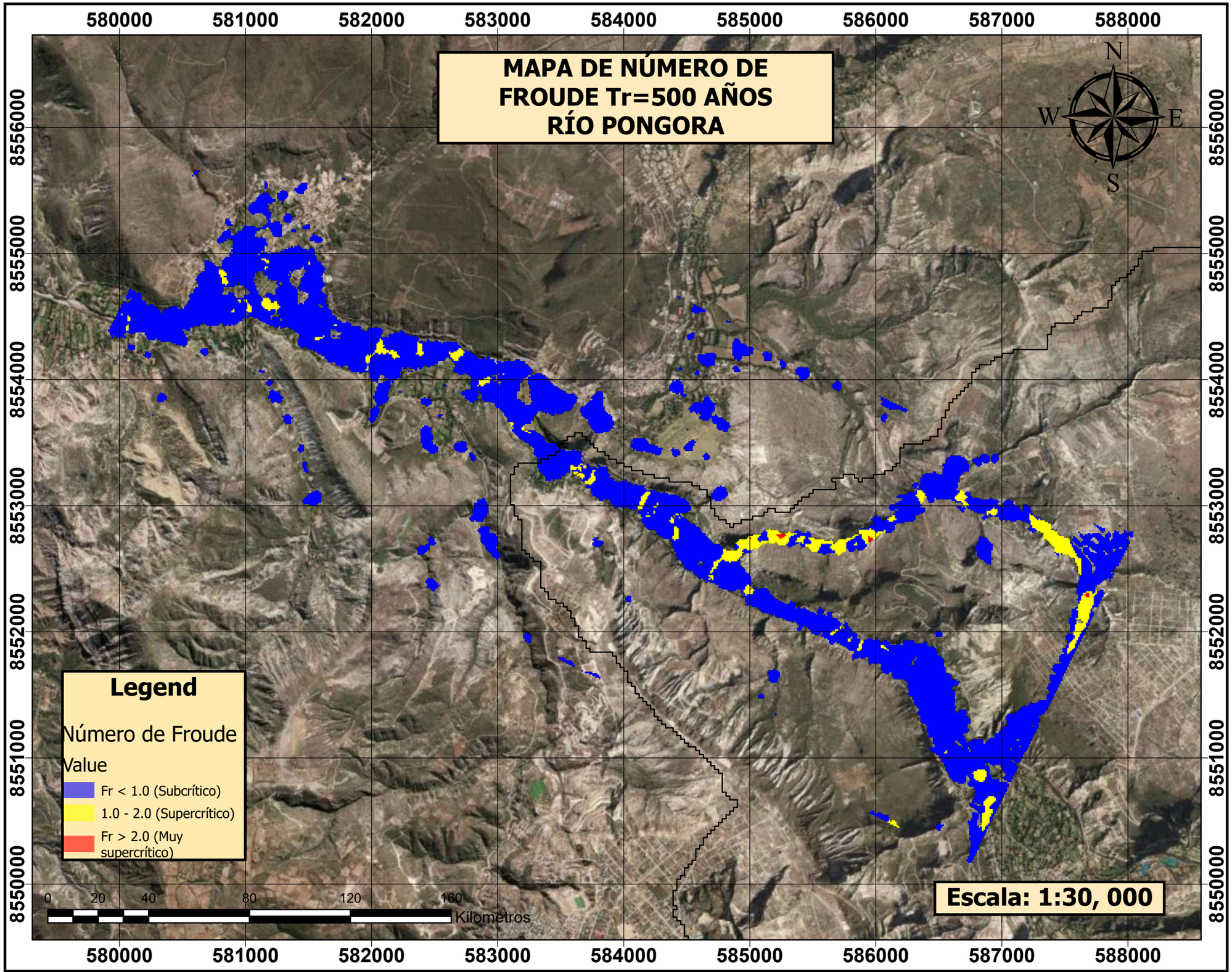
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL

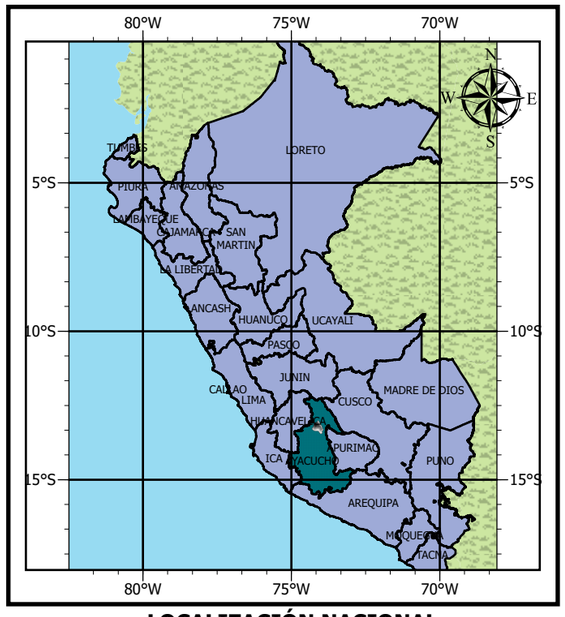


LOCALIZACIÓN DISTRITAL

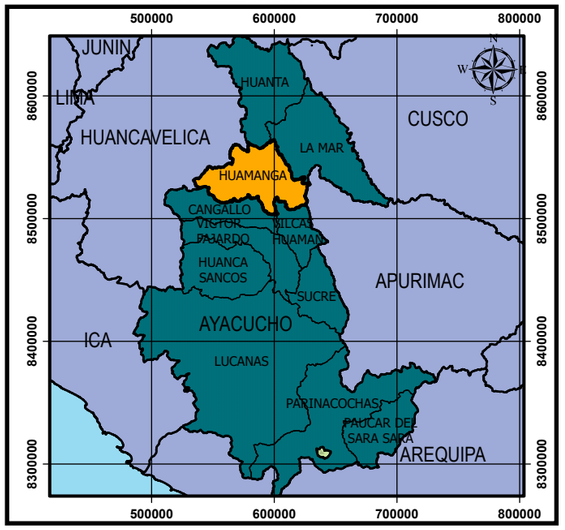


	PROYECTO: Mapa de Número de Froude Tr=500 años Río Pongora (Q=753.40 m³/s)		PROYECTO: "Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."	DISEÑO Bach. J.E.C REVISA Ing. A.S.I.H ESCALA INDICADA FECHA: Set-26	N° DE PLANO **N - 15** / FIRMA
	DEPARTAMENTO: AYACUCHO	PROVINCIA: HUAMANGA			
	DISTRITO: VARIOS	LOCALIDAD: RIO PONGORA			

MAPA DE PELIGROSIDAD POR INUNDACIÓN RÍO PONGORA



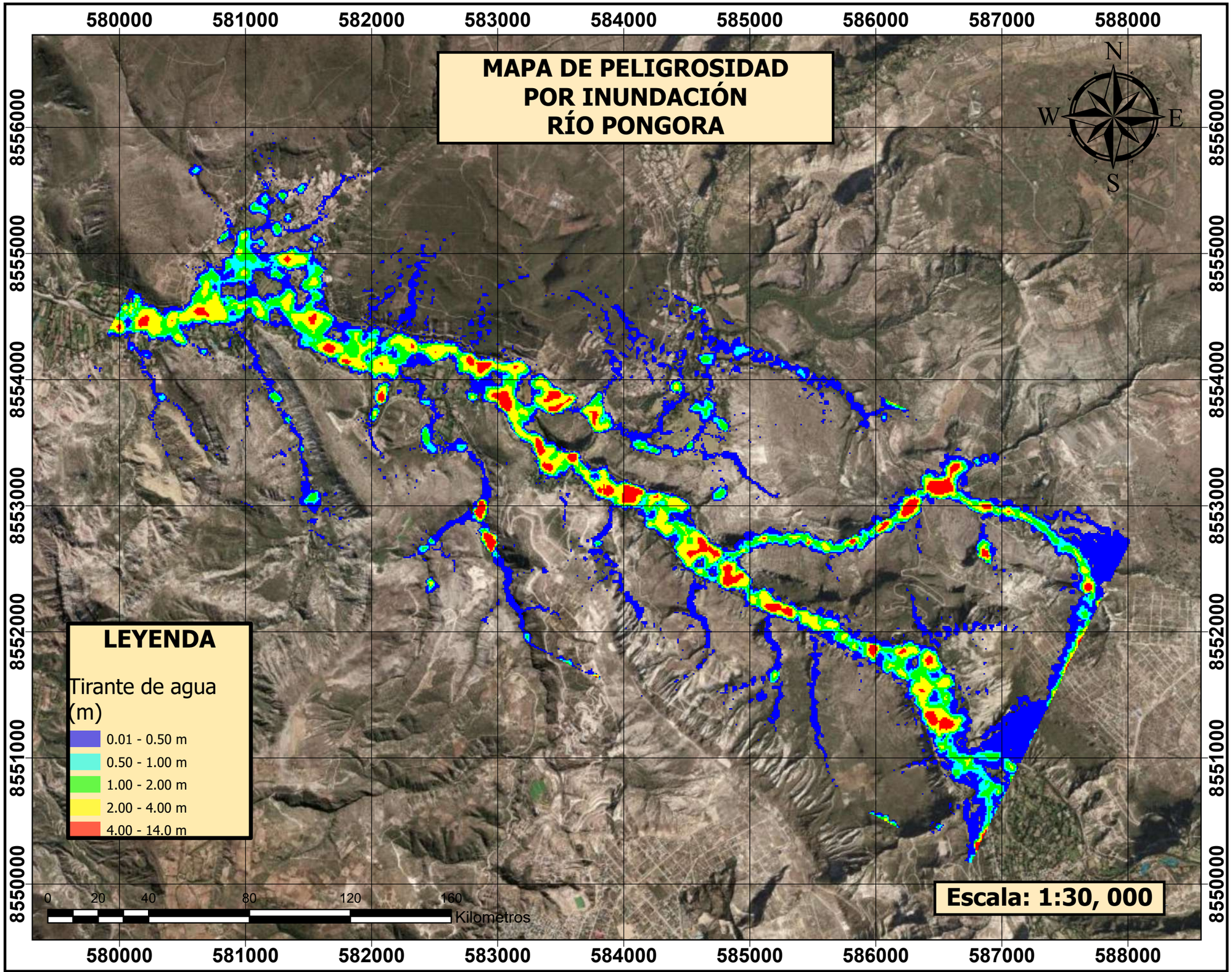
LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN REGIONAL



LOCALIZACIÓN DISTRITAL



PROYECTO: Mapa de Peligrosidad por Inundación Tr=500 años CENEPRED Río Pongora			
DEPARTAMENTO: AYACUCHO	**PROVINCIA:** HUAMANGA		
DISTRITO: VARIOS	**LOCALIDAD:** RIO PONGORA		

PROYECTO:
"Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025."

DISEÑO
Bach. J.E.C
REVISA
Ing. A.S.I.H
ESCALA
INDICADA
FECHA:
Set-26

N° DE PLANO	FIRMA
N - 16	

REGISTRO HISTÓRICO
ESTACION CUCHOQUESERA

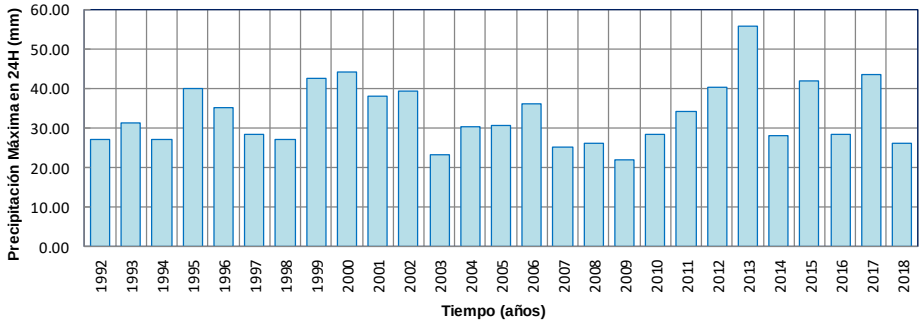
Estación: CUCHOQUESERA — Latitud :13º 25' 50,22" S — Dpto: Ayacucho
Parámetro: Precipitación Maxima en 24hrs (mm) — Longitud : 74º 20' 32,42" W — Prov: Cangallo
Altitud : 3724 msnm — Dist: Chuschi

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	MÁXIMO
1992	10.8	25.7	27.0	10.8	0.0	8.1	10.8	17.6	4.1	23.0	17.6	18.9	27.00
1993	24.3	31.1	21.6	16.2	12.2	2.0	8.8	7.4	6.8	16.2	16.2	23.0	31.10
1994	16.2	20.3	12.2	27.0	5.4	2.0	0.0	0.0	2.7	2.7	16.2	10.8	27.00
1995	23.9	33.8	39.8	9.6	2.0	3.5	2.7	2.7	14.9	3.4	11.5	27.0	39.80
1996	35.2	23.0	17.6	18.9	9.5	4.1	1.4	10.1	2.0	11.5	16.2	19.6	35.20
1997	28.4	27.7	19.6	12.2	5.4	0.0	0.7	16.9	21.0	16.9	14.9	21.6	28.40
1998	27.0	25.7	15.5	20.3	1.4	4.7	0.0	4.1	8.8	8.1	16.2	17.6	27.00
1999	16.9	42.6	17.6	18.3	2.7	3.4	3.4	2.7	15.5	16.2	13.5	S/D	42.60
2000	23.7	27.7	23.7	10.1	19.6	17.6	4.7	3.4	13.5	17.6	11.5	43.9	43.94
2001	27.0	37.9	30.4	11.5	30.4	1.4	2.7	5.4	6.8	5.4	18.9	25.9	37.86
2002	20.3	18.9	21.6	8.1	6.5	3.4	22.3	9.0	21.9	23.0	8.7	39.3	39.34
2003	23.3	15.8	18.6	8.6	4.8	0.0	1.3	10.6	11.4	7.4	11.1	14.8	23.30
2004	7.8	30.3	18.8	5.4	2.1	4.6	10.2	3.2	19.7	10.0	12.4	14.7	30.30
2005	19.1	20.6	16.9	9.8	0.0	0.0	6.7	10.0	19.9	19.3	12.9	30.6	30.60
2006	27.1	36.0	23.1	12.3	4.2	3.6	4.0	22.7	6.5	16.4	15.3	23.4	36.00
2007	25.2	22.1	24.3	16.8	3.3	0.0	3.5	5.1	5.7	13.8	15.5	18.9	25.20
2008	24.0	26.2	20.8	9.4	S/D	4.9	2.5	0.6	14.0	10.1	9.6	14.6	26.20
2009	18.7	21.4	11.6	12.1	11.8	2.0	21.8	6.1	9.7	21.0	13.6	17.5	21.80
2010	27.4	28.4	14.1	14.7	2.7	0.4	3.2	3.5	10.4	8.2	3.5	11.5	28.40
2011	25.0	34.0	12.4	20.3	2.0	1.5	6.8	4.2	7.6	17.3	14.6	24.2	34.00
2012	17.2	40.3	29.2	15.7	3.5	3.3	0.9	0.2	6.2	11.8	13.9	S/D	40.30
2013	55.6	16.2	13.4	8.0	23.0	10.7	4.5	9.1	4.1	14.1	8.0	28.6	55.60
2014	20.5	28.0	26.6	12.0	9.7	5.8	M	6.3	19.8	14.2	11.4	21.0	28.00
2015	28.8	29.3	22.0	25.0	11.0	42.0	20.0	37.0	30.0	6.6	18.2	20.5	42.00
2016	9.8	25.0	14.2	19.3	5.2	13.5	12.4	4.0	26.7	6.6	3.4	28.4	28.40
2017	43.4	23.3	12.2	21.5	15.7	0.0	2.0	4.4	0.0	18.7	13.0	23.6	43.40
2018	20.4	26.0	16.1	18.1	0.0	8.6	9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.00
PROMEDIO	24.0	27.3	20.0	14.52	7.5	5.6	6.4	7.6	11.5	12.6	12.5	21.6	33.29
DESV. EST.	9.8	6.9	6.7	5.54	7.6	8.5	6.5	8.1	8.1	6.3	4.6	9.0	8.03
MÁXIMO	55.6	42.6	39.8	27.00	30.4	42.0	22.3	37.0	30.0	23.0	18.9	43.9	55.60
MÍNIMO	7.8	15.8	11.6	5.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.80
Nº Datos	27	27	27	27.00	26	27	26	27	27	27	27	25	27.00

S/D: Sin Dato

FUENTE: SENAMHI.

HISTOGRAMA DEL REGISTRO HISTÓRICO
ESTACION CUCHOQUESERA



REGISTRO HISTÓRICO
ESTACION QUINUA

Estación: QUINUA
Parámetro: Precipitación Maxima en 24hrs (mm)

Latitud : 13°3'00"S
Longitud : 74°8'00"W
Altitud : 3215 msnm

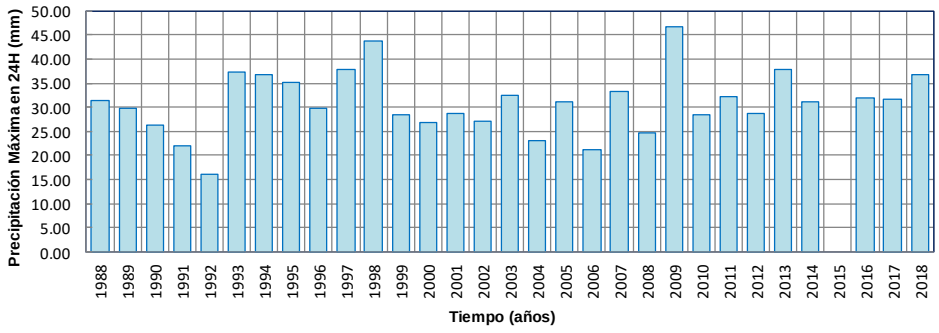
Dpto: Ayacucho
Prov: Huamanga
Dist: Quinua

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	MÁXIMO
1988	19.6	31.5	22.0	16.50	9.0	0.0	0.0	0.0	8.3	3.9	14.6	19.3	31.50
1989	29.9	11.7	19.9	8.40	11.6	6.8	2.7	7.2	17.6	9.0	10.8	25.3	29.90
1990	26.2	12.6	10.6	23.6	4.6	20.4	1.4	16.3	10.0	14.3	18.7	13.8	26.20
1991	21.9	8.0	11.9	4.50	4.3	20.4	3.5	0.0	20.2	11.0	9.1	12.7	21.90
1992	14.9	12.0	15.8	13.70	0.0	6.6	8.2	14.6	4.9	15.5	15.1	16.2	16.20
1993	17.0	37.3	14.7	10.50	6.8	7.2	9.2	9.1	17.6	19.5	10.7	18.2	37.30
1994	13.5	16.7	20.0	27.20	2.9	5.8	0.0	12.6	8.9	9.3	12.5	36.7	36.70
1995	35.2	14.0	27.9	5.8	18.8	1.3	1.2	1.0	6.5	18.6	28.6	21.8	35.20
1996	27.4	15.9	29.7	17.00	1.6	0.0	0.5	8.7	8.2	9.0	12.6	16.1	29.70
1997	29.2	24.5	37.8	12.70	3.9	0.0	4.0	10.0	16.1	4.0	12.3	26.1	37.80
1998	22.3	38.3	43.6	5.50	6.2	2.7	0.0	2.5	4.5	41.3	15.5	9.6	43.60
1999	22.6	24.0	23.7	6.20	0.5	3.5	6.4	0.0	28.4	11.2	24.2	22.4	28.40
2000	26.7	26.5	23.5	7.40	17.0	7.0	13.4	2.5	5.5	8.3	3.6	18.7	26.70
2001	19.5	21.2	28.5	12.00	16.0	1.8	18.0	6.7	21.3	28.7	19.9	18.5	28.70
2002	18.3	20.8	22.0	7.30	13.4	1.4	21.9	8.8	20.1	17.6	S/D	27.0	27.00
2003	7.0	32.4	25.8	31.50	9.5	2.6	0.3	14.3	10.8	1.0	10.8	27.4	32.40
2004	10.8	23.0	17.9	3.60	5.9	5.2	11.7	8.7	14.3	9.0	12.8	20.3	23.00
2005	9.7	28.2	S/D	21.7	10.7	0.6	6.4	0.6	9.0	12.1	21.8	31.0	31.00
2006	20.7	17.9	21.1	14.5	1.2	2.4	0.0	5.3	3.1	S/D	14.0	12.8	21.10
2007	17.8	23.4	33.2	28.2	5.5	0.0	7.7	1.3	13.0	16.2	14.5	21.0	33.20
2008	23.0	24.6	16.8	11.0	16.4	6.4	4.8	0.7	20.0	17.8	18.1	20.0	24.60
2009	27.6	46.8	7.8	14.9	9.0	0.4	2.0	4.4	9.2	8.4	21.4	14.2	46.80
2010	18.1	25.3	18.7	8.1	3.9	0.0	6.6	7.4	7.5	21.8	10.0	28.5	28.50
2011	19.3	18.6	32.1	23.0	9.9	4.2	3.1	2.1	23.6	13.4	16.6	14.0	32.10
2012	21.2	28.7	22.0	8.7	8.9	9.6	17.1	10.6	18.7	18.5	15.5	28.8	28.80
2013	23.0	20.0	17.0	7.1	11.4	4.4	3.7	25.2	14.3	37.9	33.9	24.3	37.90
2014	22.0	31.2	29.7	9.8	5.1	0.0	11.4	1.8	14.1	16.8	12.1	20.5	31.20
2015	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	0.00
2016	32.0	21.2	23.0	11.7	18.6	0.4	7.8	3.4	22.7	19.3	9.9	20.8	32.00
2017	16.5	25.3	31.7	17.8	12.9	0.3	3.9	9.0	27.0	13.3	11.0	24.8	31.70
2018	24.9	18.1	23.5	6.0	15.8	3.7	14.5	16.1	3.6	17.5	36.7	14.2	36.70
PROMEDIO	21.3	22.9	23.0	13.0	8.8	4.0	6.1	6.6	13.1	15.4	15.7	21.1	29.77
DESV. EST.	6.3	8.7	7.9	7.4	5.4	5.2	5.9	6.1	7.3	8.8	7.4	6.5	8.34
MÁXIMO	35.2	46.8	43.6	31.50	18.8	20.4	21.9	25.2	28.4	41.3	36.7	36.7	46.80
MÍNIMO	7.0	8.0	7.8	3.60	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	1.0	3.6	9.6	0.00
Nº Datos	32	32	31	32.00	32	31	32	32	32	30	31	32	33.00

S/D: Sin Dato

FUENTE: SENAMHI.

HISTOGRAMA DEL REGISTRO HISTÓRICO
ESTACION QUINUA



REGISTRO HISTÓRICO
ESTACION TAMBILLO

Estación: TAMBILLO
Parámetro: Precipitación Maxima en 24hrs (mm)

Latitud : 13°13'06.72"S
Longitud : 74°06'22.68"W
Altitud : 3343 msnm

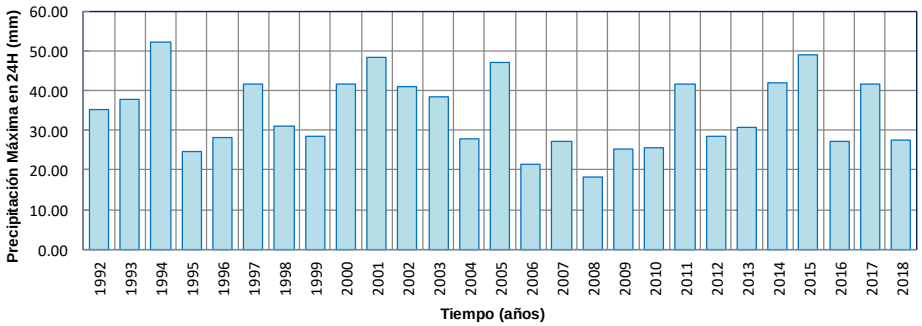
Dpto: Ayacucho
Prov: Huamanga
Dist: Tambillo

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	MÁXIMO
1992	21.2	35.3	24.4	17.50	3.1	11.1	10.0	15.5	12.7	12.8	14.0	14.0	35.30
1993	30.0	37.9	15.3	16.52	5.6	7.0	5.9	9.1	21.0	10.8	19.6	25.9	37.90
1994	21.4	27.4	52.2	25.2	2.1	4.5	10.0	6.0	5.3	7.8	16.1	18.2	52.20
1995	16.2	16.5	17.4	24.50	5.3	1.0	7.8	4.5	7.3	16.1	16.0	22.4	24.50
1996	21.7	15.4	28.3	14.10	7.0	1.4	0.3	8.1	12.2	17.9	8.5	14.4	28.30
1997	21.3	41.7	19.9	14.80	2.8	0.0	3.1	12.2	15.1	23.5	27.7	27.0	41.70
1998	31.2	24.9	21.4	18.50	2.1	8.4	0.0	0.6	16.8	13.4	7.6	15.1	31.20
1999	28.6	20.9	16.5	5.3	0.3	1.6	1.8	0.0	12.1	8.5	14.4	26.9	28.60
2000	15.1	41.5	16.4	5.20	20.8	9.8	16.6	1.3	3.4	16.0	7.3	14.8	41.47
2001	22.1	13.3	28.0	11.31	16.0	5.3	11.3	7.2	5.2	11.1	48.5	9.1	48.49
2002	17.2	28.1	41.1	12.48	6.6	1.8	13.3	5.5	13.9	8.5	12.0	23.8	41.08
2003	21.5	38.4	17.0	19.50	5.4	0.0	0.0	14.3	4.0	1.9	4.6	25.5	38.40
2004	12.2	27.9	14.5	6.30	5.6	2.4	15.8	5.5	14.2	15.3	22.4	25.2	27.90
2005	29.2	18.0	47.0	8.30	0.2	0.0	3.5	1.5	8.2	12.5	14.2	26.4	47.00
2006	21.5	13.5	20.2	18.20	1.5	1.5	0.0	6.7	3.8	20.5	8.0	10.2	21.50
2007	17.2	17.7	20.4	27.04	2.5	0.0	14.7	1.0	8.2	19.5	10.1	24.4	27.04
2008	14.7	17.7	17.6	3.50	4.6	2.0	0.0	0.9	8.1	6.8	9.6	18.3	18.33
2009	25.4	21.1	15.6	19.10	12.9	0.0	4.2	0.2	6.6	8.2	17.2	17.6	25.40
2010	25.5	13.0	19.9	7.10	5.2	0.0	0.0	7.5	6.3	14.2	7.8	21.1	25.50
2011	28.1	41.6	25.7	18.70	11.2	4.0	6.6	2.2	14.3	8.3	25.8	28.6	41.60
2012	28.4	26.4	25.1	17.90	1.7	10.1	0.6	2.9	13.2	13.9	27.1	25.2	28.40
2013	23.9	13.6	30.7	16.00	8.7	2.1	8.0	21.0	3.4	24.8	27.7	23.9	30.70
2014	22.8	12.2	23.0	11.20	5.5	0.0	6.5	0.8	20.0	22.8	17.3	42.1	42.10
2015	24.7	36.6	15.3	4.40	8.1	7.4	29.1	27.0	7.5	7.6	11.6	49.0	49.00
2016	11.4	27.2	7.4	10.00	12.5	12.2	5.3	2.3	4.5	11.7	17.4	13.3	27.20
2017	18.7	41.7	6.6	28.90	14.2	30.8	13.3	7.7	7.0	21.6	14.6	25.5	41.70
2018	22.8	16.4	3.8	11.50	4.8	27.5	17.3	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	27.50
PROMEDIO	22.0	25.4	21.9	14.56	6.5	5.6	7.6	6.8	9.4	13.2	15.8	21.8	34.44
DESV. EST.	5.4	10.5	11.1	7.09	5.1	7.8	7.2	6.7	5.4	6.4	9.7	9.7	9.28
MÁXIMO	31.2	41.7	52.2	28.90	20.8	30.8	29.1	27.0	21.0	24.8	48.5	49.0	52.20
MÍNIMO	11.4	12.2	3.8	3.50	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.33
Nº Datos	27	27	27	27.00	27	27	27	27	27	27	27	27	27.00

S/D: Sin Dato

FUENTE: SENAMHI.

HISTOGRAMA DEL REGISTRO HISTÓRICO
ESTACION TAMBILLO



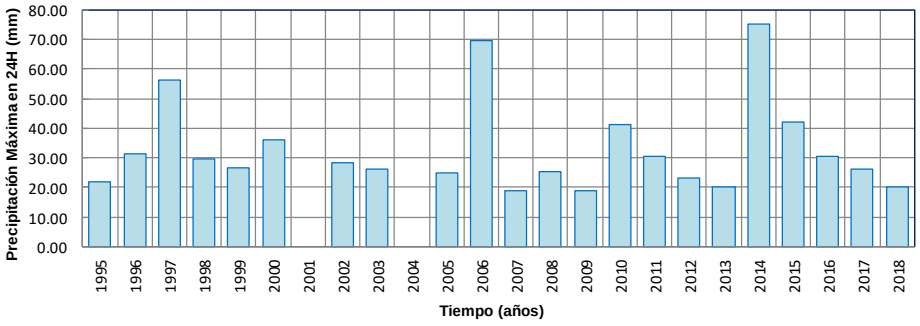
REGISTRO HISTÓRICO
ESTACION PUCALOMA

Estación: PUCALOMA — Latitud : 13°12'21,48"S — Dpto: Ayacucho
Parámetro: Precipitación Maxima en 24hrs (mm) — Longitud : 74°17'57,48"O — Prov: Huamanga
Altitud : 3493 msnm — Dist: Socos

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	MÁXIMO
1995	S/D	19.9	22.0	8.6	3.7	3.7	3.6	7.7	9.6	10.1	19.1	10.4	22.00
1996	31.3	17.5	28.2	14.2	0.2	0.0	3.8	6.6	12.8	12.7	8.5	25.7	31.30
1997	28.8	56.3	21.1	8.4	1.8	0.0	0.0	9.0	10.0	9.0	29.5	22.2	56.30
1998	25.7	29.8	18.6	3.7	2.2	3.1	0.0	1.6	7.3	10.2	5.3	13.4	29.80
1999	25.4	26.6	21.4	9.0	3.5	6.0	2.0	0.0	18.2	12.1	11.5	12.7	26.60
2000	19.2	36.1	21.4	7.2	13.2	5.5	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	36.12
2001	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	0.00
2002	16.2	28.3	8.2	6.8	4.2	2.2	9.6	4.7	5.8	7.4	7.1	7.3	28.32
2003	15.4	26.2	23.4	21.4	4.2	2.2	0.6	4.4	4.6	S/D	S/D	S/D	26.16
2004	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	0.00
2005	S/D	S/D	S/D	9.1	1.9	0.0	5.5	2.5	10.5	9.0	13.0	25.0	25.00
2006	26.2	26.0	20.5	12.0	0.0	5.3	0.0	3.5	0.7	69.5	13.0	20.4	69.50
2007	19.1	18.3	19.0	9.6	0.0	1.5	0.2	0.0	4.5	8.5	5.2	14.0	19.10
2008	17.3	14.3	10.6	3.8	12.7	4.4	0.0	0.0	9.1	13.4	6.0	25.4	25.40
2009	13.8	19.1	13.0	7.5	18.5	0.0	6.5	1.5	1.5	15.1	14.8	12.8	19.10
2010	16.1	41.0	25.3	1.8	4.0	0.0	0.0	5.5	11.0	9.4	9.3	21.5	41.00
2011	30.3	27.0	23.0	8.5	6.5	0.0	8.0	0.0	3.2	5.6	13.4	S/D	30.30
2012	13.5	19.2	20.2	14.0	3.1	0.0	1.5	12.0	5.4	3.5	7.0	23.2	23.20
2013	18.5	19.3	20.3	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	11.8	13.5	17.8	20.30
2014	24.8	13.4	17.5	10.4	10.3	2.5	5.0	0.0	7.9	3.0	75.0	12.0	75.00
2015	24.8	13.4	11.6	9.8	10.1	8.0	0.0	22.5	6.2	4.3	30.0	42.2	42.20
2016	20.2	30.3	14.6	22.2	10.2	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	30.30
2017	10.8	18.5	14.2	20.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	26.2	26.20
2018	20.4	14.9	18.4	8.4	1.8	1.4	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.40
PROMEDIO	20.9	24.5	18.7	9.86	5.3	2.6	2.8	3.9	6.1	10.7	14.9	18.1	30.15
DESV. EST.	5.9	10.4	5.1	5.79	5.1	3.0	3.9	5.5	4.9	14.6	16.2	9.3	17.46
MÁXIMO	31.3	56.3	28.2	22.20	18.5	10.4	13.5	22.5	18.2	69.5	75.0	42.2	75.00
MÍNIMO	10.8	13.4	8.2	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Nº Datos	20	21	21	22.00	22	22	21	21	21	20	20	19	24.00

S/D: Sin Dato
FUENTE: SENAMHI.

HISTOGRAMA DEL REGISTRO HISTÓRICO
ESTACION PUCALOMA



REGISTRO HISTÓRICO
ESTACION CHIARA

Estación: CHIARA
Parámetro: Precipitación Maxima en 24hrs (mm)

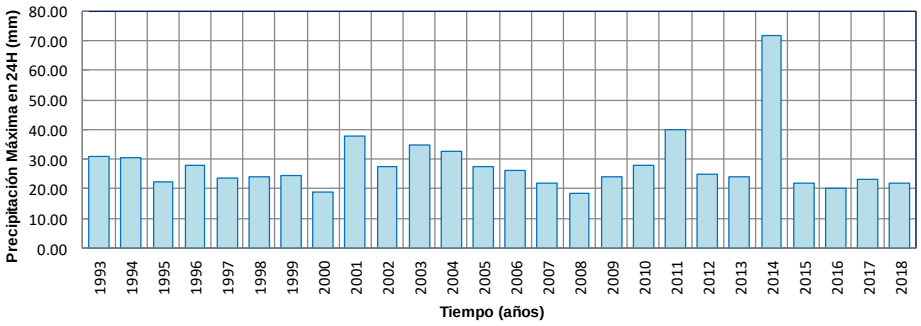
Latitud : 13º 17' 25,56" S
Longitud: 74º 12' 39,54" W
Altitud : 3587 msnm

Dpto: Ayacucho
Prov: Huamanga
Dist: Chiara

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	MÁXIMO
1993	S/D	25.0	26.4	20.40	9.2	4.0	4.0	6.6	16.5	15.2	31.0	16.5	31.00
1994	30.3	23.7	20.4	6.60	4.0	2.0	0.0	3.3	8.6	18.5	19.1	15.8	30.30
1995	22.4	15.8	18.5	7.8	3.3	2.5	2.9	5.4	11.7	12.4	20.4	8.6	22.40
1996	14.5	21.1	27.9	21.90	1.3	1.3	5.3	6.7	7.1	8.0	4.0	11.3	27.90
1997	21.1	23.7	12.0	10.30	2.6	1.3	S/D	10.3	8.6	8.6	14.6	18.1	23.70
1998	23.9	13.8	18.5	6.60	4.9	7.9	S/D	S/D	4.0	5.3	13.2	21.1	23.90
1999	18.7	23.3	24.4	11.20	4.2	4.0	6.6	S/D	12.5	10.8	17.8	17.9	24.40
2000	19.1	14.1	13.8	2.0	3.3	5.7	13.6	7.9	3.7	16.7	6.5	14.5	19.11
2001	38.0	20.3	21.5	15.82	12.4	3.0	6.2	7.9	3.4	15.0	14.5	11.9	37.96
2002	14.4	20.3	17.8	7.12	11.9	4.2	9.1	9.6	12.9	27.3	21.6	10.0	27.28
2003	6.9	29.8	34.8	23.50	6.0	0.0	0.0	10.2	6.1	3.9	6.2	14.4	34.80
2004	12.5	32.6	15.3	10.64	8.3	5.2	11.2	7.0	8.1	4.9	14.0	22.4	32.62
2005	23.3	15.9	19.4	18.60	7.3	0.0	2.9	8.4	8.2	19.6	17.8	27.3	27.30
2006	26.0	25.5	23.1	8.60	0.0	5.5	0.0	20.0	3.5	18.0	13.0	14.0	26.00
2007	17.5	22.0	20.6	3.80	3.6	0.0	1.3	0.0	2.0	11.9	6.4	15.2	22.00
2008	17.9	18.4	9.5	13.10	4.0	2.5	0.0	2.1	8.6	18.0	4.0	18.0	18.40
2009	22.4	24.0	14.3	16.80	20.6	1.8	7.2	1.0	2.4	8.8	19.2	13.8	24.00
2010	28.1	20.0	13.2	10.80	6.2	5.2	0.0	8.8	6.5	16.0	8.0	17.0	28.10
2011	26.5	40.0	18.0	12.50	6.0	0.0	10.0	0.0	12.0	7.0	13.0	13.0	40.00
2012	14.0	25.0	24.0	15.00	3.0	8.0	5.5	2.0	10.0	19.0	12.0	23.0	25.00
2013	22.0	22.0	22.0	2.50	15.0	10.5	6.5	24.0	6.7	18.0	12.0	14.0	24.00
2014	24.0	18.5	17.0	13.00	70.0	0.0	4.0	71.5	16.0	13.6	7.0	15.0	71.50
2015	22.0	0.0	14.0	6.00	12.0	1.8	18.5	13.5	6.0	14.8	8.0	15.0	22.00
2016	14.0	17.0	10.0	10.00	20.0	2.0	9.0	3.0	1.5	7.0	3.0	9.0	20.00
2017	20.0	22.0	23.0	20.00	8.0	0.0	10.0	3.4	7.0	18.2	10.0	16.0	23.00
2018	22.0	11.0	20.0	14.00	8.4	8.2	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.00
PROMEDIO	20.6	21.8	21.0	11.66	5.5	3.1	4.9	7.9	7.8	13.1	14.7	15.9	27.38
DESV. EST.	7.8	5.4	5.8	6.77	3.7	2.4	4.4	4.6	4.2	6.5	7.1	4.9	5.17
MÁXIMO	38.0	32.6	34.8	23.50	12.4	7.9	13.6	20.0	16.5	27.3	31.0	27.3	37.96
MÍNIMO	6.9	13.8	12.0	1.98	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.9	4.0	8.6	19.11
Nº Datos	14	15	15	15.00	15	15	13	13	15	15	15	15	15.00

S/D: Sin Dato
FUENTE: SENAMHI.

HISTOGRAMA DEL REGISTRO HISTÓRICO
ESTACION CHIARA



REGISTRO HISTÓRICO
ESTACION CHONTACA

Estación: CHONTACA
Parámetro: Precipitación Maxima en 24hrs (mm)

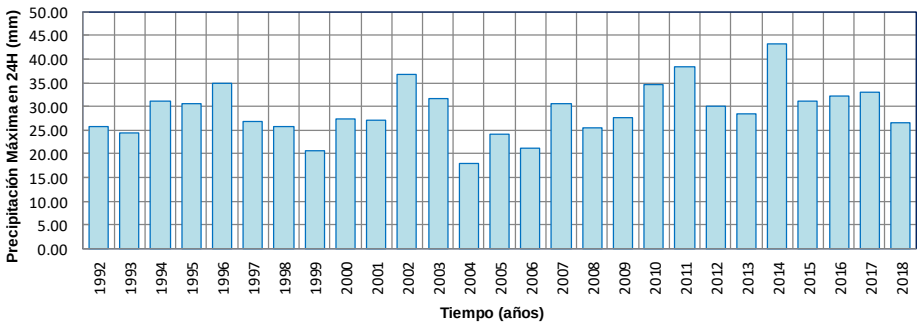
Latitud : 13°17'44,28"S
Longitud : 74°01'33,54"O
Altitud : 3497 msnm

Dpto: Ayacucho
Prov: Huamanga
Dist: Acocro

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	MÁXIMO
1992	21.6	25.7	14.2	7.40	0.7	4.7	0.7	14.2	1.4	8.1	S/D	8.1	25.70
1993	20.3	10.8	17.6	24.30	6.1	4.1	16.2	12.2	13.5	8.8	17.6	18.9	24.30
1994	31.1	19.6	20.3	9.5	3.4	4.7	0.0	3.4	10.8	22.3	14.2	20.4	31.10
1995	26.8	25.0	30.7	10.00	4.3	2.2	3.1	2.3	3.0	22.7	19.9	18.9	30.70
1996	10.8	29.2	34.9	23.40	6.2	0.5	0.0	10.8	8.9	11.5	25.4	16.1	34.90
1997	26.8	26.9	17.6	11.00	4.2	0.0	1.6	12.8	11.1	17.8	17.8	18.9	26.90
1998	20.6	25.8	23.4	14.10	5.7	17.0	0.0	0.0	8.9	20.0	7.3	17.8	25.80
1999	15.4	17.6	18.5	11.9	5.1	0.7	1.4	S/D	13.2	10.0	20.6	20.0	20.60
2000	27.3	25.4	17.6	13.66	4.1	6.8	8.4	4.3	7.7	24.1	8.4	19.2	27.31
2001	27.0	13.4	21.8	12.17	20.3	12.4	8.7	9.7	10.5	14.1	16.2	11.5	27.04
2002	16.8	23.9	20.8	11.10	9.1	2.4	20.7	5.1	10.1	14.1	36.8	17.8	36.77
2003	12.6	31.6	20.1	7.25	5.1	0.1	0.0	14.8	4.6	11.8	26.8	18.4	31.60
2004	11.4	18.1	4.8	3.10	1.2	2.8	8.7	5.7	14.5	4.0	9.5	18.0	18.10
2005	24.2	18.0	13.3	4.50	0.0	0.0	4.7	1.1	7.1	11.4	7.6	19.6	24.20
2006	16.5	19.4	21.1	13.60	1.8	4.0	0.0	3.5	7.0	20.6	14.1	16.3	21.10
2007	8.2	17.5	30.5	14.80	2.0	1.2	10.0	2.2	2.5	16.5	11.2	19.7	30.50
2008	25.4	25.1	19.0	24.70	8.0	3.9	0.0	4.0	5.7	8.6	15.6	8.8	25.40
2009	12.1	21.9	27.5	16.40	9.2	0.0	5.6	3.5	3.2	7.0	13.3	15.6	27.50
2010	27.0	17.4	20.0	8.70	5.3	0.0	2.1	10.0	2.5	8.1	9.0	34.7	34.70
2011	19.0	38.3	16.0	18.40	9.6	5.8	4.0	2.1	8.5	8.0	23.3	14.2	38.30
2012	30.0	22.0	16.7	15.00	3.2	7.2	3.0	5.2	5.0	28.0	20.0	18.6	30.00
2013	17.5	28.5	14.0	4.50	10.4	2.5	7.5	20.6	2.1	20.3	15.5	26.3	28.50
2014	43.1	19.2	35.4	15.70	12.0	0.0	13.0	0.0	10.4	20.2	0.0	0.0	43.10
2015	0.0	19.0	15.7	10.60	11.0	8.5	21.5	19.0	11.5	15.2	12.2	31.2	31.20
2016	32.3	23.7	7.4	11.20	25.2	0.5	6.0	2.2	3.2	19.0	16.5	16.0	32.30
2017	15.0	33.0	30.0	19.00	14.0	9.1	10.1	5.3	10.0	12.0	14.5	19.7	33.00
2018	21.5	23.0	10.5	5.20	8.8	4.5	26.5	12.5	5.4	0.0	0.0	0.0	26.50
PROMEDIO	20.2	21.9	20.4	12.73	5.1	4.0	4.9	6.6	8.3	14.5	16.8	17.0	27.18
DESV. EST.	6.9	5.7	7.0	6.34	4.6	4.6	6.3	5.0	3.9	6.0	7.9	3.8	4.98
MÁXIMO	31.1	31.6	34.9	24.70	20.3	17.0	20.7	14.8	14.5	24.1	36.8	20.4	36.77
MÍNIMO	8.2	10.8	4.8	3.10	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	4.0	7.3	8.1	18.10
Nº Datos	17	17	17	17.00	17	17	17	16	17	17	16	17	17.00

S/D: Sin Dato
FUENTE: SENAMHI.

HISTOGRAMA DEL REGISTRO HISTÓRICO
ESTACION CHONTACA



UNSCH FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGIA Y CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 85-2026-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal No 509-2026-FIMGC-D**, a los **veintiocho días del mes de octubre de 2026**, siendo las **10:13 a.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **MSc. José Ernesto ESTRADA CARDENAS**, y los miembros: **Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI**, **Ing. Edward LEÓN PALACIOS** y **Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO**, actuando como secretario docente el **Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNÁNDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero Civil**, del Bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil:

JONATHAN ESPINO CANCHARI

Quien presentó la tesis denominada:

Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho - 2025

Los señores miembros del jurado luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con 16 (dieciséis)

Siendo las **11:19 a.m.** del día **28 de octubre del 2026**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad de lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. José Ernesto ESTRADA CARDENAS
Presidente

Ing. Edward LEÓN PALACIOS
Miembro

Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO
Miembro

Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI
Miembro - Asesor

Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNÁNDEZ
Secretario

FACULTAD DE INGENIERÍA
DE MINAS Y CIVIL
Av. Independencia S/N
Ciudad Universitaria
Central Tel. 066 312510
Anexo 151

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N.° 03-2026-FIMGC/MGTP

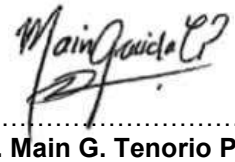
La suscrita, en calidad de Docente Instructor de Verificación de la Originalidad de Trabajos de Investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en cumplimiento del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad, aprobado mediante Resolución de Consejo Universitario N.° 039-2021-UNSCH-CU, y de la Resolución Decanal n.° 507-2026-FIMGC-D, dejo constancia de que se ha efectuado la verificación de originalidad del trabajo de investigación correspondiente a:

Apellidos y nombres	:	Espino Canchari, Jonathan
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Título del trabajo de investigación	:	Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho – 2025.
Índice de similitud obtenido	:	11 %
Identificador de entrega	:	3088698282
Fecha de evaluación	:	13 de noviembre de 2026

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, resulta **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines académicos y administrativos correspondientes.

Se expide la presente constancia en señal de conformidad y para los fines pertinentes.

Ayacucho, 13 de noviembre de 2026.



Mg. Ing. Main G. Tenorio Palomino

Con depósito para trámites
Cc. Archivo.

FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS, GEOLOGIA Y CIVIL
Av. Independencia S/N Ciudad Universitaria
Central Tel. 066 312510
Anexo 151

Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho - 2025

por Jonathan Espino Canchari

Fecha de entrega: 13-nov-2026 11:52a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 3088698282
Nombre del archivo: Borrador_de_Tesis_JONATHAN_ESPINO_CANCHARI.pdf (41.92M)
Total de palabras: 54635
Total de caracteres: 305133

Evaluación del comportamiento hidráulico del río Pongora a partir del análisis morfométrico y modelación numérica con elementos finitos, Ayacucho - 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%	9%	5%	7%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	4%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
4	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.unach.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad Nacional de Ingenieria Trabajo del estudiante	<1%
8	apirepositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	idoc.pub Fuente de Internet	<1%
10	repositorio.upao.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1%
12	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
13	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1%
14	repositorio.uniscjsa.edu.pe Fuente de Internet	<1%
	repositorio.usil.edu.pe	

15	Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	pci.uas.edu.mx Fuente de Internet	<1 %
18	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
19	Submitted to Universidad de Guayaquil Trabajo del estudiante	<1 %
20	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
21	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1 %
22	Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes Trabajo del estudiante	<1 %
23	Submitted to Universidad Católica de Colombia Trabajo del estudiante	<1 %
24	Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador Trabajo del estudiante	<1 %
25	Submitted to Universidad Nacional Hermilio Valdizan Trabajo del estudiante	<1 %
26	pdfcoffee.com Fuente de Internet	<1 %
27	Submitted to Universidad Nacional Agraria la Molina Trabajo del estudiante	<1 %
28	archive.org Fuente de Internet	<1 %
29	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1 %
30	editorial.univalle.edu Fuente de Internet	<1 %
31	repositorio.escuelaing.edu.co Fuente de Internet	<1 %
32	www.coursehero.com Fuente de Internet	

		<1 %
33	www.sochid.cl Fuente de Internet	<1 %
34	www.ing.unlp.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
35	Submitted to Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo Trabajo del estudiante	<1 %
36	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
37	ribuni.uni.edu.ni Fuente de Internet	<1 %
38	dokumen.site Fuente de Internet	<1 %
39	riunet.upv.es Fuente de Internet	<1 %
40	Submitted to uncedu Trabajo del estudiante	<1 %
41	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
42	repositorio.unsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
43	Cerron Rondon, Ana Maria. "Evaluación de riesgo por inundación fluvial y su incidencia en el desarrollo del centro poblado Nuevo San Martín, distrito Nuevo Progreso-Tocache-San Martín, 2024.", Universidad Continental (Peru) Publicación	<1 %
44	Submitted to Docentes Trabajo del estudiante	<1 %
45	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
46	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 30 words
Excluir bibliografía	Activo		