

UNIVERSIDAD DE HUANUCO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

“Empleo del modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C como un recurso en la mitigación de efectos hidráulicos en los soportes del puente Daniel Alomía Robles, Huánuco – 2024”

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA CIVIL

AUTORA: Casimiro Salvador, Mabel Guisela

ASESORA: Arteaga Espinoza, Ingrid Delia Dignarda

HUÁNUCO – PERÚ

2025

U

D

H

**TIPO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:**

- Tesis (X)
- Trabajo de Suficiencia Profesional()
- Trabajo de Investigación ()
- Trabajo Académico ()

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: Hidráulica**AÑO DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN** (2020)**CAMPO DE CONOCIMIENTO OCDE:****Área:** Ingeniería, Tecnología**Sub área:** Ingeniería civil**Disciplina:** Ingeniería civil**DATOS DEL PROGRAMA:**

Nombre del Grado/Título a recibir: Título Profesional de Ingeniera Civil

Código del Programa: P07

Tipo de Financiamiento:

- Propio (X)
- UDH ()
- Fondos Concursables ()

DATOS DEL AUTOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 71733149

DATOS DEL ASESOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 73645168

Grado/Título: Máster en dirección de proyectos

Código ORCID: 0009-0001-0745-5433

DATOS DE LOS JURADOS:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES	GRADO	DNI	Código ORCID
1	Malpartida Valderrama, Yenerit Pamela	Grado de magíster en medio ambiente y desarrollo sostenible mención en gestión ambiental	22516875	0000-0003-2705-4300
2	Aguilar Alcantara, Leonel Marlo	Maestro en ingeniería civil con mención en dirección de empresas de la construcción	43415813	0000-0002-0877-5922
3	Martinez Canchari, Roger Ruben	Maestro en gestión y negocios, con mención en gestión de proyectos	42804800	0009-0002-5954-4603



PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO(A) CIVIL**

En la ciudad de Huánuco, siendo las 18:00 horas del día lunes 17 de noviembre de 2025, en cumplimiento de lo señalado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad de Huánuco, se reunieron los Jurados Calificadores integrado por los docentes:

- | | |
|--|------------|
| ❖ MG. YENERIT PAMELA MALPARTIDA VALDERRAMA | PRESIDENTE |
| ❖ MG. LEONEL MARLO AGUILAR ALCANTARA | SECRETARIO |
| ❖ MG. ROGER RUBEN MARTINEZ CANCHARI | VOCAL |

Nombrados mediante la RESOLUCIÓN No 2436-2025-D-FI-UDH para evaluar la Tesis intitulada: "EMPLEO DEL MODELO MATEMÁTICO HIDROMORFODINÁMICO TEDRI-1D7C COMO UN RECURSO EN LA MITIGACIÓN DE EFECTOS HIDRÁULICOS EN LOS SOPORTES DEL PUENTE DANIEL ALOMÍA ROBLES, HUÁNUCO – 2024", presentado por el (la) Bachiller. Bach Mabel Guisela CASIMIRO SALVADOR, para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) Civil.

Dicho acto de sustentación se desarrolló en dos etapas: exposición y absolución de preguntas: procediéndose luego a la evaluación por parte de los miembros del Jurado.

Habiendo absuelto las objeciones que le fueron formuladas por los miembros del Jurado y de conformidad con las respectivas disposiciones reglamentarias, procedieron a deliberar y calificar, declarándolo(a) Aprobado por mayoría..... con el calificativo cuantitativo de 11..... y cualitativo de Suficiente..... (Art. 47).

Siendo las 19:00 horas del día 17 del mes de noviembre del año 2025, los miembros del Jurado Calificador firman la presente Acta en señal de conformidad.

MG. YENERIT PAMELA MALPARTIDA
VALDERRAMA
DNI: 22516875
ORCID: 0000-0003-2705-4300
PRESIDENTE

MG. LEONEL MARLO AGUILAR ALCANTARA
DNI: 43415813
ORCID: 0000-0002-0877-5922
SECRETARIO (A)

MG. ROGER RUBEN MARTINEZ CANCHARI
DNI: 42804800
ORCID: 0009-0002-5954-4603
VOCAL



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El comité de integridad científica, realizó la revisión del trabajo de investigación del estudiante: MABEL GUISELA CASIMIRO SALVADOR, de la investigación titulada "EMPLEO DEL MODELO MATEMÁTICO HIDROMORFODINÁMICO TEDRI-1D7C COMO UN RECURSO EN LA MITIGACIÓN DE EFECTOS HIDRÁULICOS EN LOS SOPORTES DEL PUENTE DANIEL ALOMÍA ROBLES, HUÁNUCO - 2024", con asesor(a) INGRID DELIA DIGNARDA ARTEAGA ESPINOZA, designado(a) mediante documento: RESOLUCIÓN N° 1863-2024-D-FI-UDH del P. A. de INGENIERÍA CIVIL.

Puede constar que la misma tiene un índice de similitud del 8 % verificable en el reporte final del análisis de originalidad mediante el Software Turnitin.

Por lo que concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con todas las normas de la Universidad de Huánuco.

Se expide la presente, a solicitud del interesado para los fines que estime conveniente.

Huánuco, 01 de septiembre de 2025

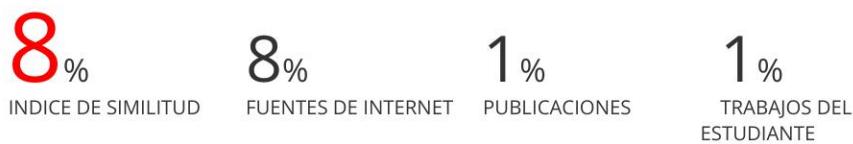


RICHARD J. SOLIS TOLEDO
D.N.I.: 47074047
cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



MANUEL E. ALIAGA VIDURIZAGA
D.N.I.: 71345687
cod. ORCID: 0009-0004-1375-5004

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	repository.udh.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
3	distancia.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
4	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
5	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
6	repository.uladech.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
7	repository.uta.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
8	repository.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
9	Submitted to Universidad Nacional Hermilio Valdizan Trabajo del estudiante	<1 %



RICHARD J. SOLIS TOLEDO
D.N.I.: 47074047
cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



MANUEL E. ALIAGA VIDURIZAGA
D.N.I.: 71345687
cod. ORCID: 0009-0004-1375-5004

DEDICATORIA

A mis amados padres quienes son el pilar fundamental de mi vida, donde su comprensión y amor me dieron las fuerzas para poder culminar una etapa importante, este trabajo es un tributo a su sacrificio y dedicación.

A mis hermanos por su constante apoyo y motivación, los amo más de lo que las palabras pueden expresar.

AGRADECIMIENTO

A Dios quién me brinda la oportunidad de vivir y me concede salud, sabiduría y fortaleza, así como una familia maravillosa que me motiva a seguir adelante.

A mi madre Editha quién me da las fuerzas para continuar con mis logros, por su esfuerzo y motivación desde el primer día que inicié mi carrera, por su apoyo emocional y sacrificios, a mi padre Freddy por su constante respaldo y amor inquebrantable, a mis hermanos Alvin y Stiven por sus palabras de aliento y confianza en mis capacidades me han dado la fuerza necesaria para superar los desafíos.

A mis estimados docentes de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Huánuco, quienes me brindaron los conocimientos necesarios para afrontar diferentes desafíos en esta etapa profesional.

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	XIII
CAPÍTULO I	15
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	15
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	15
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.2.1 PROBLEMA GENERAL.....	16
1.2.2 PROBLEMA ESPECÍFICO	16
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.5.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	17
1.5.2 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	17
1.5.3 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	18
1.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.7 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
CAPÍTULO II	20
MARCO TEÓRICO	20
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	20
2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	20
2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES.....	21
2.1.3 ANTECEDENTES LOCALES	23
2.2 BASES TEÓRICAS	24
2.2.1 INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS MATEMÁTICOS HIDROMORFODINÁMICOS	24
2.2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MODELO TEDRI-1D7C	26
2.2.3 EFECTOS HIDRÁULICOS EN LOS SOPORTES	

DE PUENTES.....	31
2.2.4 APLICACIÓN DEL MODELO TEDRI-1D7C EN LA MITIGACIÓN DE EFECTOS HIDRÁULICOS	38
2.3 DEFINICIONES CONCEPTUALES	43
2.4 HIPÓTESIS.....	44
2.5 VARIABLES.....	45
2.5.1 VARIABLE DEPENDIENTE.....	45
2.5.2 VARIABLE INDEPENDIENTE	45
2.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES (DIMENSIONES E INDICADORES).....	46
CAPÍTULO III.....	47
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	47
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	47
3.1.1 ENFOQUE	47
3.1.2 ALCANCE O NIVEL.....	47
3.1.3 DISEÑO.....	48
3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA	48
3.2.1 POBLACIÓN.....	48
3.2.2 MUESTRA	49
3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	49
3.3.1 PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS	49
3.3.2 PARA LA PRESENTACIÓN DE DATOS	51
3.3.3 PARA EL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS ..	52
CAPÍTULO IV.....	53
RESULTADOS.....	53
4.1 PROCESAMIENTO DE DATOS	53
4.2 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y PRUEBA DE HIPÓTESIS ..	82
CAPÍTULO V.....	87
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	87
CONCLUSIONES	89
RECOMENDACIONES	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXOS	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables	46
Tabla 2 Instrumento de recolección de datos	51
Tabla 3 Determinación de parámetros básicos de la cuenca	57
Tabla 4 Determinación de parámetros de forma.....	58
Tabla 5 Identificación de las coberturas vegetales de la cuenca	59
Tabla 6 Estimación del número de curva	60
Tabla 7 Identificación de los valores de precipitación para la cuenca.....	61
Tabla 8 Identificación de la mejor serie de distribución.....	68
Tabla 9 Análisis granulométrico	71
Tabla 10 Clasificación de suelo	72
Tabla 11 Contenido de humedad de la muestra	73
Tabla 12 Modelo de socavación progresiva de modelo TEDRI	80
Tabla 13 Determinación de parámetros básicos de la cuenca	82
Tabla 14 Modelo de socavación progresiva de modelo TEDRI	84
Tabla 14 Matriz de Consistencia.....	97
Tabla 15 Clasificación de alturas de cuenca.....	101
Tabla 16 Características hidrográficas.....	101
Tabla 17 Identificación de pendiente de cuenca	1020
Tabla 18 Valores de identificación de curva IDF.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Socavación de puente	32
Figura 2 Distribución de tensiones bajo una cimentación	34
Figura 3 Distribución de tensiones bajo una cimentación	37
Figura 4 Aplicación de los modelos hidráulicos	39
Figura 5 Identificación de los límites de la cuenca del río Higueras.....	53
Figura 6 Modelo de elevación digital de la cuenca	54
Figura 7 Modelo de pendientes de cuenca	54
Figura 8 Red hídrica de la cuenca	55
Figura 9 Identificación de coberturas vegetales de la cuenca	56
Figura 10 Rangos de número de curva para la cuenca	57
Figura 11 Curva hipsométrica y polígono de frecuencia	60
Figura 12 Promedios mensuales de precipitación	62
Figura 13 Análisis de precipitaciones acumuladas	63
Figura 14 Determinación de ajuste con Distribución Normal	64
Figura 15 Determinación de ajuste con Distribución Log-Normal 2 parámetros	64
Figura 16 Determinación de ajuste con Distribución Log-Normal 3 parámetros	65
Figura 17 Determinación de ajuste con Distribución Gamma 2 parámetros .65	65
Figura 18 Determinación de ajuste con Distribución Gamma 3 parámetros .66	66
Figura 19 Determinación de ajuste con Distribución Log-Pearson Tipo III ...66	66
Figura 20 Determinación de ajuste con Distribución Gumbel	67
Figura 21 Determinación de ajuste con Distribución LogGumbel	67
Figura 22 Estimación de los valores de lluvia proyectados.....	68
Figura 23 Curvas IDF para la cuenca	69
Figura 24 Hietograma de diseño.....	69
Figura 25 Modelo Hec-HMS para la cuenca	70
Figura 26 Plano topográfico de la zona de interés.....	71
Figura 27 Curva granulométrica.....	72
Figura 28 Creación del modelo para el análisis TEDRI-1D7C	73
Figura 29 Modelo de esquemas hidráulicos	74
Figura 30 Análisis de rugosidad en los cauces	74

Figura 31 Modelo bidimensional de la zona de interés	75
Figura 32 Perfiles de cauce del río levantados	75
Figura 33 Sección del puente Daniel Alomía Robles	76
Figura 34 Ingreso de valores de suelo identificados	76
Figura 35 Sección de río con caudal simulado	77
Figura 36 Identificación de los sedimentos del cauce	77
Figura 37 Reporte del modelo hidráulico	78
Figura 38 Efecto de socavación en los pilares del puente	79
Figura 39 Hietograma de diseño.....	82
Figura 40 Plano topográfico de la zona de interés.....	83
Figura 41 Efecto de socavación en los pilares del puente	84
Figura 42 Reporte del modelo hidráulico	85
Figura 42 Ubicación de la zona de estudio.....	99
Figura 43 Zona de interés	100

RESUMEN

El Puente Daniel Alomía Robles, ubicado en Huánuco, presenta una alta vulnerabilidad estructural debido a los procesos de socavación provocados por el río Higueras, especialmente durante eventos hidrológicos extremos. Estudios recientes han mostrado que, en caso de que ocurra una crecida extrema con un periodo de retorno de 500 años, la socavación podría llegar hasta los 11.46 metros en el estribo izquierdo del puente, lo cual representa un riesgo serio para su estabilidad. Este problema se debe principalmente al aumento del caudal del río, causado por lluvias intensas, modificaciones en el uso del suelo dentro de la cuenca, y también por la falta de mantenimiento adecuado en la infraestructura. Ante esta situación, el estudio plantea el uso del modelo hidromorfodinámico TEDRI-1D7C, el cual permite simular con bastante precisión el comportamiento del río y cómo este afecta a las estructuras del puente. Para ello, se incorporaron datos topográficos, hidrológicos, morfodinámicos y geotécnicos, con el objetivo de generar distintos escenarios de flujo y analizar el impacto que podrían tener. Gracias a esta simulación, se pueden identificar las zonas más vulnerables a la erosión, estimar la profundidad de la socavación y proponer soluciones estructurales como defensas ribereñas, espigones o canales de encauzamiento. Los resultados obtenidos a través del modelo demostraron una notable disminución en la presión hidráulica, el caudal y la profundidad de socavación en los estribos cuando se aplican las medidas recomendadas. Por esta razón, el TEDRI-1D7C se presenta como una herramienta útil para anticiparse a los daños, controlar los efectos de las crecidas y reducir el impacto del agua sobre el Puente Daniel Alomía Robles. Su uso también ayuda a tomar mejores decisiones técnicas y de inversión en infraestructuras viales que están expuestas a condiciones hidrológicas extremas. Dentro del trabajo, se realizó un análisis hidrológico completo de la cuenca del río Higueras. Esto incluyó la delimitación del área, la elaboración de modelos digitales de elevación y la identificación de parámetros geomorfológicos y morfodinámicos. Además, se hicieron simulaciones con el modelo TEDRI-1D7C, incorporando datos de precipitaciones, caudales y transporte de sedimentos, lo que permitió verificar su capacidad para anticipar cómo se

desarrollarían los impactos en distintos escenarios extremos. También se llevaron a cabo estudios de campo para recopilar información topográfica y sobre la mecánica de suelos. Estos datos se complementaron con modelado digital y análisis estadísticos de series de precipitaciones. Gracias a ello, se pudo conocer con mayor detalle las condiciones del cauce y del terreno, mostrando diferencias importantes en los niveles de erosión entre los estribos y en la efectividad de las medidas de mitigación propuestas. Los hallazgos resaltan la utilidad del modelo TEDRI-1D7C como herramienta decisiva para el diseño de intervenciones estructurales, asegurando la durabilidad y seguridad del puente a largo plazo.

Palabras claves: Modelo Hidromorfodinámico, Impactos Hidráulicos, Parámetros Hidrológicos, Mecánica de Suelos, Mitigación.

ABSTRACT

The Daniel Alomía Robles Bridge, located in Huánuco, presents high structural vulnerability due to scour processes caused by the Higueras River, especially during extreme hydrological events. Recent studies reveal that, for a 500-year return period, scour reaches up to 11.46 meters at the left abutment, representing a critical risk to the bridge's stability. This issue mainly arises from increased river flow resulting from intense rainfall, changes in land use within the watershed, and the lack of infrastructure maintenance.

In response to this scenario, the study proposes the application of the hydromorphodynamic model TEDRI-1D7C, which allows for accurate simulation of the river's hydraulic behavior and its effects on the bridge supports. The model integrates topographic data, hydrological, morphodynamic, and geotechnical parameters to simulate flow scenarios and assess the magnitude of hydraulic impacts. Its application significantly contributes to impact mitigation by identifying critical erosion zones, quantifying scour levels, and proposing structural measures such as riverbank defenses, groynes, or channelization.

The model's results show a significant reduction in pressure, flow rate, and scour levels at the abutments when simulation-based solutions are implemented. Therefore, TEDRI-1D7C stands out as an effective tool to anticipate, control, and reduce hydraulic impacts on the supports of the Daniel Alomía Robles Bridge, ensuring its long-term functionality and structural safety. This methodology also supports future technical and investment decisions in road infrastructure exposed to severe hydrological conditions.

Among the conducted studies, the comprehensive hydrological analysis of the Higueras River basin stands out, which included watershed delineation, the creation of digital elevation models, and the identification of geomorphological and morphodynamic parameters. Additionally, quantitative simulations were carried out using the TEDRI-1D7C model, integrating data on precipitation, flow rates, and sediment transport, allowing for the validation of the model's predictive capability to anticipate the evolution of hydraulic impacts under extreme scenarios.

Furthermore, field studies were conducted to obtain topographic and soil mechanics information, complemented by digital modeling techniques and statistical analysis of precipitation series. These studies provided accurate data on channel characteristics and ground conditions, revealing significant differences in abutment erosion and the effectiveness of proposed mitigation measures. The findings highlight the usefulness of the TEDRI-1D7C model as a decisive tool for designing structural interventions, ensuring the long-term durability and safety of the bridge.

Keywords: Hydromorfodinamic Model, Hydraulic Impacts, Hydrological Parameters, Soil Mechanics, Mitigation.

INTRODUCCIÓN

En el contexto de las crecientes amenazas naturales asociadas al cambio climático y a la intervención antrópica en los cauces fluviales, la infraestructura vial enfrenta desafíos estructurales significativos, especialmente cuando se encuentra expuesta a procesos hidromorfológicos intensos. Un caso representativo es el del Puente Daniel Alomía Robles, ubicado sobre el río Higueras, en la ciudad de Huánuco, cuya estabilidad estructural está siendo comprometida por fenómenos de socavación progresiva. De acuerdo con estudios recientes, se ha identificado que la socavación en el estribo izquierdo del puente alcanza una profundidad de 3.99 metros para un periodo de retorno de 50 años, mientras que en el estribo derecho llega a 1.61 metros. Estas cifras aumentan considerablemente en un escenario de 500 años, alcanzando 4.86 metros en el lado izquierdo y 3.54 metros en el derecho (Robles Cabrera, 2023). Estos niveles representan un riesgo constante para la estabilidad del puente, afectando directamente la continuidad del tránsito y poniendo en peligro la seguridad de quienes lo utilizan. Las principales causas de este problema están relacionadas con el aumento del caudal del río debido a lluvias intensas, cambios en el uso del suelo que aceleran el escurrimiento superficial, y la falta de un mantenimiento adecuado del cauce. Ante esta situación, resulta fundamental utilizar herramientas tecnológicas que permitan evaluar, simular y reducir los impactos que genera el agua sobre la infraestructura. En este contexto, el modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C se presenta como una opción eficiente para analizar cómo se comporta el flujo del agua y cómo este interactúa con el cauce y las estructuras cercanas. Gracias a este modelo, es posible estimar la socavación, la presión del agua y el comportamiento del río frente a distintos escenarios hidrológicos. Con esta información, se pueden plantear soluciones que se adapten a las condiciones reales del entorno. Aplicar el modelo TEDRI-1D7C resulta clave para reducir los efectos negativos del agua sobre los soportes del puente, ya que permite detectar las zonas más vulnerables a la erosión, evaluar propuestas como espigones, muros de encauzamiento o enrocados, y anticiparse a los daños que podrían causar eventos extremos. Además, este estudio no solo tiene un valor técnico

dentro del campo de la ingeniería hidráulica, sino que también busca aportar en la toma de decisiones estratégicas para gestionar mejor los riesgos y planificar intervenciones que aseguren el funcionamiento del puente a largo plazo. En resumen, esta investigación propone el uso del modelo TEDRI-1D7C como una herramienta integral de diagnóstico y mitigación, en línea con los principios de seguridad vial, sostenibilidad y resiliencia frente a eventos climáticos extremos.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El Puente Daniel Alomía Robles, ubicado en la ciudad de Huánuco, viene enfrentando serios problemas debido a la socavación provocada por el río Higueras. De acuerdo con estudios recientes, se ha determinado que la profundidad de socavación llega a 3.99 metros en el estribo izquierdo y 1.61 metros en el derecho para un periodo de retorno de 50 años. En un escenario más extremo, con un periodo de 500 años, estas cifras aumentan a 4.86 y 3.54 metros respectivamente (Robles Cabrera, 2023). Estos valores muestran una amenaza creciente para la estabilidad del puente y para la seguridad de quienes lo usan a diario.

Las principales causas de este problema están relacionadas con el aumento del caudal del río, producto de lluvias intensas y cambios en el uso del suelo en la cuenca, lo que incrementa la erosión y el arrastre de sedimentos. A esto se suma la falta de mantenimiento regular y monitoreo, lo que hace que los estribos estén más expuestos a los efectos de la erosión (Robles Cabrera, 2023).

También influyen factores geotécnicos del terreno, como la baja cohesión de los suelos de cimentación, su facilidad para erosionarse y su poca capacidad de carga. Todo esto contribuye al desgaste progresivo de los estribos y pilas del puente. Además, las actividades humanas, como la modificación del cauce, la deforestación de las riberas, la ocupación desordenada de zonas cercanas y los cambios en el uso del suelo, agravan aún más el problema al alterar el comportamiento natural del río y aumentar la carga de sedimentos. La ausencia de obras de protección y el escaso mantenimiento también han acelerado el deterioro de la infraestructura.

Si no se actúa a tiempo, esta situación podría generar consecuencias graves, como el colapso parcial o total del puente, la interrupción del tránsito y, en el peor de los casos, pérdidas económicas o humanas. Por eso, el uso de modelos matemáticos como el TEDRI-1D7C se vuelve una alternativa útil para simular cómo afectan las condiciones hidráulicas a los soportes del puente y proponer soluciones eficaces (Yajahuanca Roncal, 2023).

En resumen, aplicar el modelo TEDRI-1D7C resulta fundamental para entender mejor los efectos de la socavación sobre el Puente Daniel Alomía Robles, y para implementar medidas que garanticen su seguridad y funcionamiento a largo plazo.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 PROBLEMA GENERAL

¿Cómo puede la aplicación del modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C contribuir a la mitigación de los impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco - 2025?

1.2.2 PROBLEMA ESPECÍFICO

¿Cuáles son los parámetros hidrológicos y morfodinámicos del Río Higueras para su aplicación en el modelo matemático?

¿Cómo se puede obtener la información topográfica y de mecánica de suelos en la zona de estudio incluida en la investigación?

¿Cómo se utiliza el modelo matemático de manera efectiva al considerar las condiciones de frontera?

¿Cómo se previene los efectos hidráulicos que podrían originarse en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco?

1.3 OBJETIVO GENERAL

Aplicar el modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C como herramienta para mitigar los impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco - 2025

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Establecer los parámetros hidrológicos y morfodinámicos del Río Higueras que se aplicarán en el modelo matemático.

Recopilar información topográfica y de mecánica de suelos en la zona de estudio incluida en la investigación.

Utilizar el modelo matemático considerando las condiciones de frontera.

Prever los efectos hidráulicos que se puedan originar en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco.

1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

En el desarrollo de esta investigación, se empleará el modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C como una herramienta esencial para simular y predecir los efectos hidráulicos que afectan a los soportes del Puente Daniel Alomía Robles en Huánuco. Gracias a este modelo, será posible analizar con mayor precisión cómo interactúa el flujo del río Huallaga con la estructura del puente. Esto permitirá identificar los patrones de erosión y sedimentación que podrían estar afectando las bases de la infraestructura. A partir de los resultados obtenidos con el modelo, se podrán evaluar distintas alternativas de mitigación, las cuales serán diseñadas específicamente para responder a las condiciones reales del lugar, garantizando así intervenciones más efectivas y duraderas. Este estudio propone un enfoque novedoso que combina el análisis hidromorfológico avanzado con aspectos clave de la ingeniería estructural, lo cual representa un gran aporte para la protección de infraestructuras viales ubicadas en zonas fluviales con comportamientos dinámicos. Además, este enfoque no solo tiene valor a nivel local, sino que también puede servir como un modelo aplicable a otras regiones del país que enfrentan riesgos similares. En ese sentido, la investigación busca validar el uso del modelo TEDRI-1D7C como una herramienta útil y confiable para la gestión y protección de infraestructuras estratégicas, especialmente ante los desafíos hidráulicos que surgen por las condiciones hidrológicas extremas que se presentan con frecuencia en el Perú.

1.5.2 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

Esta investigación tiene una justificación práctica clara, ya que busca ofrecer una solución técnica para reducir los impactos del agua sobre los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, a través del uso del modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C. Gracias a este modelo, será posible predecir con precisión cómo se presentan los procesos de erosión y sedimentación alrededor de las bases del puente, lo que ayudará a identificar las zonas más críticas y a mejorar las estrategias de protección y mantenimiento. Los resultados de este

estudio podrán ser utilizados en el futuro por ingenieros y autoridades locales para aplicar medidas preventivas y correctivas de manera más eficiente. Esto no solo permitirá alargar la vida útil del puente, sino que también contribuirá a mejorar la seguridad vial en la región de Huánuco.

Además, esta investigación marcará un precedente en el uso de modelos avanzados dentro de la ingeniería civil en el Perú, abriendo la posibilidad de aplicar este tipo de herramientas en otros puentes ubicados en zonas expuestas a riesgos hidráulicos. De este modo, se estará aportando al desarrollo sostenible de la infraestructura vial en todo el país.

1.5.3 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

La metodología de esta investigación estará centrada en la aplicación del modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C, con el objetivo de simular y analizar cómo los efectos del agua impactan en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles. Para ello, se utilizarán datos hidrológicos y geomorfológicos específicos del río Huallaga, que serán obtenidos a través de estaciones hidrométricas y levantamientos topográficos realizados en la zona de estudio. Una vez recopilada esta información, se integrará en el modelo TEDRI-1D7C para realizar simulaciones que permitan observar distintos escenarios de caudal, sedimentación y erosión. Luego, los resultados obtenidos serán validados comparándolos con datos históricos sobre procesos erosivos y condiciones hidráulicas en el área. Con base en estas simulaciones, se diseñarán propuestas de mitigación orientadas a reducir los niveles de erosión y reforzar la estabilidad estructural del puente. Estas estrategias serán evaluadas para determinar su efectividad y aplicabilidad en condiciones reales. En conjunto, este enfoque busca desarrollar una herramienta predictiva que no solo contribuya a la protección del Puente Daniel Alomía Robles, sino que también sirva como referencia para la planificación y conservación de otras infraestructuras similares. De esta forma, se promueve un uso más eficiente y sostenible de los recursos en futuros proyectos de ingeniería.

1.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Entre las principales limitaciones de esta investigación se encuentra la disponibilidad y precisión de los datos hidrológicos y geomorfológicos del río Huallaga. En algunos casos, esta información podría no reflejar con exactitud las condiciones reales del flujo del río, especialmente durante eventos climáticos extremos o poco frecuentes. Además, la capacidad del modelo TEDRI-1D7C para hacer predicciones confiables dependerá en gran medida de cómo se calibren y validen los datos utilizados. Si los registros históricos no son lo suficientemente completos o precisos, esto podría afectar los resultados del modelo. Por otro lado, las estrategias de mitigación que se propongan también podrían enfrentar ciertas limitaciones, ya que su aplicación en la vida real dependerá de factores como el presupuesto disponible y las condiciones técnicas del lugar. Estas restricciones podrían influir en el grado de efectividad que tengan las medidas al momento de ser implementadas.

1.7 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

La viabilidad de esta investigación se sustenta en el acceso a herramientas tecnológicas avanzadas, como el modelo TEDRI-1D7C, y en la disponibilidad de datos hidrológicos y geomorfológicos, los cuales serán proporcionados por instituciones locales. Estos recursos permitirán desarrollar el estudio de manera efectiva y con el respaldo técnico necesario. Además, se contará con la colaboración de expertos en dinámica fluvial y estructuras, así como con recursos financieros y logísticos provenientes de instituciones regionales y académicas. La infraestructura de investigación necesaria, como estaciones hidrométricas y software especializado, será accesible, lo que permitirá la realización eficiente de las simulaciones y análisis previstos dentro del cronograma establecido.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Salguero (2021) En su trabajo de investigación titulado: “*Caracterización del comportamiento hidráulico del río Ambato en el tramo comprendido entre el sector Tilulún y el sector Las Viñas desde el km 8+00 al km 12+00 mediante un modelo matemático*”, realizado en la Universidad Técnica Ambato, en Ecuador. El objetivo principal del estudio fue analizar y caracterizar el comportamiento hidráulico del río Ambato en un tramo específico, utilizando un modelo matemático para entender mejor las dinámicas de flujo y posibles riesgos asociados a inundaciones. La metodología de este proyecto de titulación se basó en una investigación bibliográfica, orientada a recopilar información relevante sobre temas como hidráulica fluvial, hidrología, estadística hidrológica, caudales máximos, flujo en canales abiertos y el uso de modelos numéricos aplicados al estudio del comportamiento del agua en canales. Para ello, se revisaron fuentes confiables, como libros especializados, artículos científicos, normativas técnicas y documentos disponibles en línea. Además, se hizo uso de plataformas académicas reconocidas, como Science Direct, ResearchGate y Google Académico, lo que permitió acceder a información actualizada y de calidad. Junto con la revisión teórica, se recopilaron datos topográficos e hidrológicos del tramo del río en estudio, los cuales fueron fundamentales para la calibración y validación de un modelo hidráulico mediante software especializado. Una vez validado el modelo, se realizaron simulaciones bajo diferentes condiciones de flujo con el fin de analizar el comportamiento del río. Los resultados mostraron cambios importantes en la capacidad del cauce y permitieron identificar zonas vulnerables al desbordamiento. A partir de esta información, se reconocieron puntos críticos con alto riesgo de inundación. Las conclusiones del estudio resaltaron la importancia de aplicar medidas de mitigación y una adecuada gestión del agua, basadas en los resultados obtenidos con el

modelo. Se recomendaron intervenciones específicas para mejorar el drenaje y reducir el riesgo en las áreas más vulnerables. En general, esta investigación brindó datos valiosos para la planificación hídrica en la región, demostrando la utilidad de los modelos matemáticos como herramientas clave en la evaluación y prevención de riesgos hidráulicos.

2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES

Yajahuanca (2023), en su investigación titulada “Aplicación del Modelo Matemático Hidromorfodinámico TEDRI-1D7C como Herramienta en la Prevención de Efectos Hidráulicos en los Cimientos del Puente Reque”, desarrollada en la Universidad Señor de Sipán (Perú), tuvo como objetivo principal utilizar el modelo TEDRI-1D7C para anticipar y mitigar los efectos hidráulicos que afectan la estabilidad de los cimientos del Puente Reque. El estudio, de enfoque descriptivo, se basó en la recopilación y análisis de antecedentes del área de estudio, sirviendo como base para el desarrollo del proyecto. Se realizaron levantamientos topográficos y muestreos de suelo para su análisis posterior. Los resultados demostraron que en el modelo unidimensional, las velocidades del flujo aumentaban al trabajar con caudales máximos, mientras que el modelo bidimensional ofrecía resultados más representativos de la realidad. La investigación incluyó la integración de datos topográficos, hidrológicos y geotécnicos, así como la calibración y validación del modelo. Las simulaciones permitieron analizar diversos escenarios de flujo, revelando que ciertos eventos podrían generar una erosión significativa alrededor de los cimientos. Como conclusión, se destacó la importancia de aplicar medidas preventivas basadas en los resultados del modelo, como estructuras de protección o modificaciones en el cauce. Este trabajo resaltó el valor de los modelos matemáticos para identificar riesgos hidráulicos y guiar intervenciones en infraestructuras clave como el Puente Reque.

Por su parte, Huisa y Huanca (2024), en su estudio “Hidrodinámica y morfodinámica de un tramo urbano del río Coata y su influencia en la proyección de obras civiles”, realizado en la Pontificia Universidad Católica del Perú, centraron su análisis en cómo las dinámicas fluviales

influyen en el diseño y planificación de obras civiles en zonas urbanas. El trabajo incluyó una recopilación detallada de datos topográficos, hidrológicos y sedimentológicos del tramo en estudio, los cuales fueron procesados mediante un modelo matemático para simular el comportamiento del flujo y la sedimentación bajo diferentes condiciones. Se compararon tres metodologías de modelado cuasi 2D utilizando el software SWMM 5.1: la primera, basada en conexiones directas 1D-2D; la segunda, con conexiones mediante orificios laterales; y una tercera opción que malla completamente el canal para resolver el flujo como un modelo 1D extendido, permitiendo simular el paso del agua por estructuras como puentes. Las simulaciones revelaron patrones de erosión y deposición de sedimentos que afectan directamente la estabilidad de las zonas colindantes. Las conclusiones subrayaron la importancia de incorporar este tipo de análisis en la planificación de obras civiles, y recomendaron medidas como estructuras de control de erosión y estabilización de riberas. Este trabajo aportó una base técnica sólida para el diseño de infraestructuras más resistentes frente a dinámicas fluviales complejas en zonas urbanas.

En otro estudio relevante, Pinedo y Salinas (2023) presentaron la investigación titulada “Análisis de alternativas para mitigar los efectos de socavación en cimentaciones de puentes y evitar el colapso de estribos. Caso: Puente Morón Chaclacayo-Lima”, desarrollada en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. El objetivo fue identificar y evaluar soluciones efectivas para reducir los efectos de la socavación en las cimentaciones del Puente Morón, con el fin de evitar el colapso de sus estribos. La metodología combinó una revisión exhaustiva de literatura especializada con la recopilación de datos de campo a través de inspecciones visuales, ensayos geotécnicos y mediciones hidrológicas. El estudio, de tipo descriptivo y explicativo, se apoyó en el análisis documental de fuentes secundarias y en simulaciones mediante modelos numéricos. Entre las alternativas evaluadas se incluyeron enrocados, contrafuertes y geotextiles. Los resultados mostraron que la combinación de enrocados y geotextiles era la opción más eficaz para

reducir la socavación y mejorar la estabilidad de los estribos. Las conclusiones enfatizaron la necesidad de implementar medidas preventivas y mantener un monitoreo constante para asegurar la integridad estructural del puente. También se destacó la importancia de integrar el análisis geotécnico e hidráulico en el diseño y mantenimiento de infraestructuras vulnerables a eventos hidrológicos extremos.

2.1.3 ANTECEDENTES LOCALES

Marrujo (2023), en su investigación titulada “Modelamiento hidráulico y planteamiento de alternativas de obras de protección del tramo del río Vilcanota; longitud de 10.0 km aprox. de 1.9 km aguas arriba del puente Mollebamba hasta 2.4 km aguas abajo del puente Urcos–2022”, desarrollada en la Universidad de Huánuco (Perú), tuvo como objetivo principal modelar el comportamiento hidráulico de un tramo del río Vilcanota y proponer alternativas de obras de protección para reducir los riesgos de erosión e inundación en la zona. El estudio siguió un enfoque cuantitativo, ya que se utilizaron modelos numéricos para validar las variables analizadas. Como parte de la metodología, se recopilaron datos topográficos e hidrológicos del tramo en estudio, los cuales fueron integrados en un software de modelación hidráulica que permitió simular el comportamiento del flujo bajo diferentes escenarios. Se realizaron diversas simulaciones para evaluar la efectividad de distintas propuestas, entre ellas la construcción de diques, muros de contención y la estabilización de las márgenes mediante el uso de vegetación. Los resultados indicaron que ciertas combinaciones de estas medidas podrían reducir considerablemente los efectos de la erosión y el riesgo de inundación en las zonas más vulnerables del río. Las conclusiones del estudio resaltaron la importancia de adoptar un enfoque integral que combine infraestructuras tradicionales con soluciones basadas en la naturaleza para lograr una gestión más sostenible del río Vilcanota. Entre las recomendaciones se incluyó la construcción de diques en puntos críticos, el uso de vegetación nativa para estabilizar las riberas y la implementación de un sistema de monitoreo constante del flujo y la sedimentación para asegurar la eficacia de las medidas en el tiempo. Esta investigación constituye una valiosa referencia para la

planificación y ejecución de obras de protección hidráulica en zonas propensas a fenómenos de erosión e inundación.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS MATEMÁTICOS HIDROMORFODINÁMICOS

2.2.1.1 ¿QUÉ SON LOS MODELOS HIDROMORFODINÁMICOS?

Los modelos hidromorfodinámicos son herramientas computacionales que nos permiten simular el comportamiento del agua y cómo se mueve el sedimento en ríos y zonas costeras. Para lograr esto, combinan conocimientos de hidráulica, hidrología y mecánica de sedimentos, con el objetivo de representar procesos como la erosión, el transporte y la acumulación de material (García, 2023).

Estos modelos funcionan resolviendo ecuaciones matemáticas —principalmente ecuaciones diferenciales— que representan cómo se conserva la masa del agua, su movimiento y cómo se transporta el sedimento. Así se obtiene una idea detallada de cómo varían factores como el caudal, la velocidad del flujo, la profundidad del agua o la cantidad de sedimentos en diferentes puntos y momentos (García, 2023).

Utilizar este tipo de modelos es muy útil para prever cómo reaccionarán los ríos o cuerpos de agua ante diferentes escenarios, como la construcción de obras hidráulicas, el desmonte de vegetación o incluso los efectos del cambio climático. Gracias a ellos, es posible tomar decisiones más informadas para proteger los recursos hídricos, prevenir desastres como inundaciones y restaurar ecosistemas naturales (García, 2023).

2.2.1.2 ¿POR QUÉ SON IMPORTANTES ESTOS MODELOS EN INGENIERÍA HIDRÁULICA?

En la ingeniería hidráulica, los modelos hidromorfodinámicos son aliados clave porque permiten simular cómo se comporta un río o canal bajo diferentes condiciones, ya sean naturales o generadas por el ser humano. Su uso nos ayuda a entender mejor

los riesgos y a diseñar soluciones efectivas. A continuación, te explico algunas razones por las que estos modelos son tan importantes (Ramírez, 2024):

a) Diseño y mejora de infraestructuras hidráulicas:

Estos modelos ayudan a proyectar obras como presas, canales, puentes o sistemas de drenaje. Simular el comportamiento del agua en distintas situaciones permite verificar si estas estructuras serán seguras y eficientes.

b) Prevención de inundaciones:

Permiten anticipar cómo se comportará un río en caso de lluvias intensas, ayudando a identificar zonas en riesgo y a plantear medidas de protección como diques o sistemas de alerta temprana.

c) Evaluación ambiental:

También son útiles para estudiar cómo una obra podría afectar el entorno natural, ayudando a prevenir o mitigar impactos negativos.

d) Restauración de ecosistemas:

Gracias a estos modelos, se pueden planificar proyectos que busquen recuperar ríos o zonas húmedas, por ejemplo, mediante la reforestación o la eliminación de obstáculos artificiales.

e) Gestión del agua:

Finalmente, son herramientas valiosas para manejar el recurso hídrico de manera eficiente, pensando en el abastecimiento humano, el riego agrícola u otros usos.

2.2.1.3 ¿En qué se pueden usar estos modelos?

Los modelos hidromorfodinámicos tienen muchas aplicaciones en el ámbito de la ingeniería hidráulica. A continuación, menciono algunas de las más comunes (Quispe, 2023):

a) Diseño de infraestructuras:

Se usan para planificar obras como puentes, presas o canales, simulando cómo interactúan con el flujo del agua.

b) Control de inundaciones:

Ayudan a identificar zonas propensas a inundaciones y a plantear soluciones como diques o áreas de retención.

c) Conservación ambiental:

Son útiles para diseñar proyectos de restauración de ríos y humedales, con el objetivo de mejorar la calidad del agua y recuperar hábitats naturales.

d) Análisis de impacto ambiental:

Permiten anticipar los efectos de una obra sobre el medio ambiente, facilitando la toma de decisiones más responsables.

e) Gestión de cuencas:

Contribuyen a planificar el uso del agua en una región, considerando su disponibilidad, uso agrícola, humano y ecológico.

f) Simulación de eventos extremos:

Se usan para modelar situaciones como lluvias intensas, crecidas de ríos o tsunamis, ayudando a reducir daños potenciales.

2.2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MODELO TEDRI-1D7C

2.2.2.1 ¿QUÉ ES EL MODELO TEDRI-1D7C?

El modelo TEDRI-1D7C es una herramienta matemática diseñada para analizar el comportamiento del agua y los sedimentos en ríos y canales. Lo que hace es resolver un conjunto de ecuaciones que describen el flujo del agua y cómo este arrastra o deposita sedimentos (Castañeda, 2022).

Este modelo trabaja en una sola dimensión (1D), lo que significa que se enfoca en la dirección principal del flujo, promediando los efectos laterales y verticales. Esta forma de trabajar lo hace más simple y rápido de calcular, pero sin perder mucha precisión en escenarios donde no hay grandes variaciones tridimensionales (Castañeda, 2022).

Una de las cosas más útiles del TEDRI-1D7C es que relaciona el movimiento del agua con el transporte de sedimentos. Así se puede ver, por ejemplo, cómo una crecida puede cambiar el fondo del río, o cómo una estructura como un puente puede alterar el flujo y causar erosión. Además, este modelo ya ha sido probado en varios estudios, demostrando que sus resultados son bastante confiables (Castañeda, 2022).

2.2.2.2 ¿EN QUÉ PRINCIPIOS SE BASA EL MODELO TEDRI-1D7C?

El modelo TEDRI-1D7C se apoya en leyes fundamentales de la física y las matemáticas que explican cómo se comporta el agua en movimiento y cómo arrastra y deposita sedimentos en un río o canal. A continuación, te explico los principales conceptos que sustentan este modelo:

❖ Ecuación de Continuidad

Esta ecuación se encarga de representar la conservación de la masa del agua en movimiento. En palabras simples, lo que entra a un tramo del río debe ser igual a lo que sale, teniendo en cuenta si el nivel del agua sube o baja. Esta ecuación nos permite saber cómo varía el caudal y la profundidad a lo largo del cauce:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

donde A es el área de la sección transversal del flujo, Q es el caudal, t es el tiempo y x es la distancia a lo largo del cauce del río (Pérez, 2023).

❖ Ecuación de Cantidad de Movimiento

Esta se basa en la segunda ley de Newton, y nos ayuda a entender cómo el agua gana o pierde velocidad dependiendo de factores como la pendiente del terreno, la fricción del lecho del río o la presencia de obstáculos. En

esencia, nos dice qué fuerzas están actuando sobre el flujo y cómo afectan su comportamiento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gA(h+z) \right) = gA(S_0 - S_f)$$

donde g es la aceleración debido a la gravedad, h es la altura del agua, z es la elevación del lecho del río, S_0 es la pendiente del fondo y S_f es la pendiente de energía debido a la fricción (Pérez, 2023).

❖ Ecuación de Transporte de Sedimentos

Esta parte del modelo explica cómo el agua transporta sedimentos como arena, grava o arcilla. También analiza cuándo estos sedimentos se depositan o cuándo vuelven a levantarse del fondo del río. El modelo toma en cuenta la velocidad del flujo, el tipo de material y la pendiente del cauce para calcular estos procesos:

$$\frac{\partial(cA)}{\partial t} + \frac{\partial(cQ)}{\partial x} = E - D$$

Donde c representa la concentración de sedimentos, E la tasa de erosión y D la tasa de deposición de sedimentos (Pérez, 2023).

Para resolver las ecuaciones que explican el comportamiento del agua y los sedimentos en el río, el modelo TEDRI-1D7C utiliza técnicas numéricas bastante sofisticadas. En concreto, se apoya en métodos como las diferencias finitas y los volúmenes finitos, que permiten dividir el tiempo y el espacio en pequeñas porciones, facilitando así los cálculos. Además, el modelo cuenta con algoritmos especiales que ayudan a mantener la estabilidad del sistema, incluso cuando las condiciones del flujo se vuelven muy complejas o no lineales (Pérez, 2023).

Lo más interesante del TEDRI-1D7C es que no solo analiza el flujo del agua, sino que también considera cómo se transportan y depositan los sedimentos. Esta interacción dinámica le permite predecir cómo cambiará el lecho del río con el tiempo, sobre todo ante la presencia de obras hidráulicas o eventos extremos como lluvias intensas. Gracias a este enfoque integral, el modelo se convierte en una herramienta muy útil para gestionar de manera sostenible los recursos hídricos y planificar adecuadamente las infraestructuras (Pérez, 2023).

2.2.2.3 ¿CÓMO SE RESUELVEN LAS ECUACIONES EN EL MODELO TEDRI-1D7C?

Para poder trabajar con las ecuaciones matemáticas del modelo, es necesario traducirlas a un formato que las computadoras puedan entender y resolver. Para ello, el TEDRI-1D7C utiliza dos métodos principales: el de diferencias finitas y el de volúmenes finitos. Estos métodos convierten las ecuaciones continuas en un conjunto de ecuaciones más simples que pueden ser resueltas paso a paso, en distintas ubicaciones y momentos:

❖ Método de Diferencias Finitas

Este enfoque permite calcular los cambios en el tiempo y en el espacio dividiendo el dominio del río en puntos específicos, llamados nodos. Es muy útil para simular el caudal y la velocidad del agua, ya que trabaja bien con las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento.

❖ Método de Volúmenes Finitos

Aquí, en lugar de trabajar con puntos, se consideran pequeñas áreas o volúmenes de control dentro del cauce. Este método es más adecuado para simular cómo se transportan y depositan los sedimentos, ya que ayuda a conservar mejor la masa en cada tramo del río.

Para garantizar que las simulaciones sean estables y no se descontrolen, el modelo también emplea técnicas de estabilización, como suavizados y esquemas centrados.

Estas herramientas permiten obtener resultados más precisos y confiables, incluso en condiciones complicadas o con alta variabilidad (Martínez, 2024).

2.2.2.4 ¿CÓMO SE VALIDA Y CALIBRA EL MODELO?

Una parte fundamental de cualquier modelo matemático es asegurarse de que realmente representa bien la realidad. Para lograrlo, se realizan dos procesos clave: la validación, que compara los resultados del modelo con datos reales, y la calibración, que ajusta ciertos parámetros del modelo para que los resultados coincidan mejor con lo observado.

❖ Validación del Modelo:

Validar el TEDRI-1D7C implica comprobar qué tan bien predice variables como el caudal, la altura del agua, la velocidad del flujo o la concentración de sedimentos. El proceso suele seguir los siguientes pasos:

1. Recolección de Datos de Campo: Se recopilan datos reales del río en estudio, como mediciones del caudal, niveles del agua o características del fondo del cauce.

2. Simulación Inicial: Se ejecuta el modelo con parámetros estándar o tomados de estudios previos.

3. Evaluación del rendimiento: Se comparan los resultados del modelo con los datos reales, usando métricas estadísticas como el coeficiente de determinación (R^2), el error absoluto medio (MAE) o el error cuadrático medio (RMSE). Si el modelo reproduce bien la realidad, se considera validado.

❖ Calibración del Modelo:

Si los resultados iniciales no son del todo precisos, se ajustan ciertos parámetros internos del modelo en un proceso llamado calibración. Este incluye:

1. Selección de parámetros a ajustar: Se identifican los factores que más influyen, como la rugosidad del cauce o los coeficientes de transporte de sedimentos.

2. Ajuste iterativo: Los parámetros se modifican uno a uno (o mediante algoritmos automáticos), hasta lograr una buena coincidencia con los datos observados.

3. Nueva evaluación: Tras cada ajuste, se vuelve a correr el modelo y se comparan los nuevos resultados.

4. Validación cruzada: Para asegurarse de que el modelo no esté demasiado ajustado a un solo conjunto de datos, se prueba con información diferente a la usada en la calibración.

Este modelo ya ha sido probado y ajustado en diversos estudios realizados en Perú, donde ha demostrado ser bastante confiable al predecir cómo se comporta el agua y los sedimentos en distintas condiciones naturales. Su uso no solo apoya la planificación de obras hidráulicas, sino que también fortalece la toma de decisiones para el manejo integral de los ríos (López, 2024).

2.2.3 EFECTOS HIDRÁULICOS EN LOS SOPORTES DE PUENTES

2.2.3.1 ¿QUÉ EFECTOS GENERA EL AGUA EN LAS ESTRUCTURAS QUE SOSTIENEN UN PUENTE?

Los elementos que sostienen un puente, como las pilas y los estribos, pueden verse afectados por distintos fenómenos hidráulicos, sobre todo cuando el río experimenta crecidas o eventos extremos como inundaciones. Estas estructuras, al estar en contacto directo con el agua que fluye, sufren ciertas fuerzas y efectos que pueden dañar su estabilidad con el tiempo.

A continuación, se explica uno de los principales problemas que enfrentan:

❖ Socavación Local:

Este fenómeno ocurre cuando la corriente del río empieza a erosionar el material del lecho justo alrededor de las pilas o estribos del puente. Cuando el agua choca con estas estructuras, se acelera y forma remolinos o vórtices que van removiendo el material del fondo. Con el tiempo, esto puede generar huecos o socavones que dejan expuestas las

bases del puente. Si este proceso avanza mucho y no se controla, puede llegar a comprometer seriamente la estabilidad de la estructura, incluso al punto de causar su colapso (González, 2024).

Figura 1

Socavación de puente



Fuente. (González, 2024)

❖ **Erosión generalizada del lecho del río:**

A diferencia de la socavación localizada, que se da en un punto específico, la erosión general afecta un tramo amplio del cauce. En este proceso, el río va arrastrando progresivamente el material del fondo, debilitando la base sobre la que descansan las estructuras del puente. Este fenómeno puede empeorar si el régimen del río cambia o si se realizan actividades como la extracción de sedimentos (González, 2024).

❖ **Presión del agua y fuerzas de flotación:**

Durante una crecida, el agua ejerce más presión sobre las estructuras sumergidas. Esta presión, conocida como hidrostática, puede generar una fuerza ascendente (flotación) que empuje hacia arriba algunos elementos del puente, provocando desplazamientos o incluso levantamientos si no están bien asegurados (González, 2024).

❖ **Golpes de escombros y objetos flotantes:**

Cuando el río arrastra ramas, troncos o restos sólidos durante una creciente, estos pueden chocar violentamente

contra las pilas del puente. Estos impactos pueden dañar físicamente las estructuras, alterar el flujo de agua y, además, facilitar la socavación al crear turbulencias adicionales (González, 2024).

❖ **Vibraciones provocadas por el flujo:**

El agua al pasar alrededor de los soportes puede generar remolinos que inducen vibraciones. Estas vibraciones repetidas, aunque parezcan pequeñas, pueden dañar los materiales de la estructura con el tiempo, generando fatiga y aumentando el riesgo de fallos (González, 2024).

❖ **Acumulación de sedimentos:**

A veces, el río deposita arena o grava alrededor de los soportes. Aunque esto podría parecer una protección, también puede cambiar el curso del agua, haciendo que el flujo se dirija con más fuerza hacia otras zonas del puente y genere socavación en puntos no previstos (González, 2024).

❖ **Efectos combinados del viento y del agua:**

En zonas con condiciones climáticas extremas, el viento puede crear oleajes o aumentar la energía del flujo. Esta combinación intensifica los procesos de erosión y socavación, poniendo en riesgo la integridad de las estructuras (González, 2024).

Entender cómo estos factores afectan a los soportes de los puentes es clave para diseñar estructuras más resistentes y duraderas. Por eso, los ingenieros utilizan modelos hidromorfodinámicos y sistemas de monitoreo para identificar los riesgos y aplicar soluciones como protecciones con roca, disipadores de energía o refuerzos en las bases de los puentes (González, 2024)

2.2.3.2 ¿QUÉ CONSECUENCIAS TRAE LA SOCAVACIÓN Y EROSIÓN EN LOS SOPORTES DE LOS PUENTES?

Tanto la socavación como la erosión son procesos naturales del río, pero cuando afectan a las bases de un puente pueden

causar daños graves. A continuación, se detallan algunos de los efectos más importantes:

❖ **Debilitamiento de las fundaciones:**

La socavación puede dejar al descubierto las bases que sostienen el puente, lo que reduce su capacidad para soportar peso. Si el suelo alrededor de las fundaciones desaparece, estas quedan sin apoyo y pueden asentarse de forma irregular o desplazarse. En casos extremos, esto puede causar el colapso parcial o total del puente (Huarcaya, 2023).

❖ **Pérdida del material de soporte:**

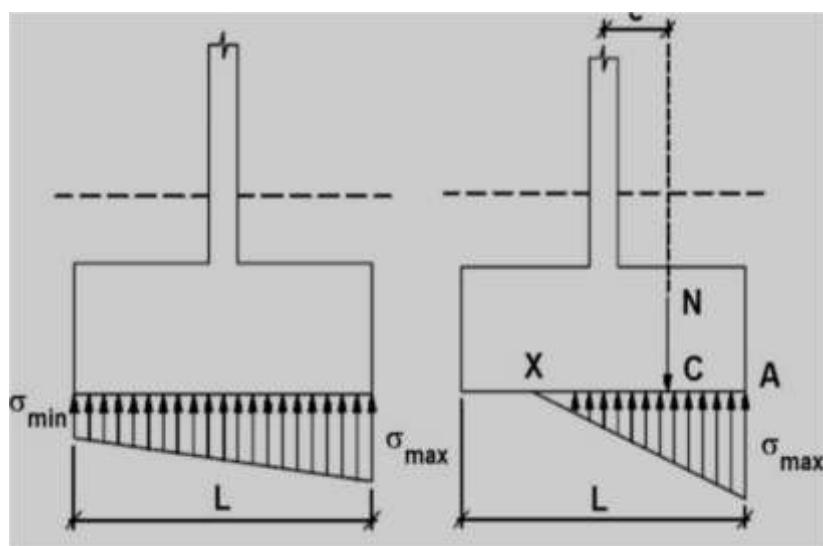
Cuando el fondo del río se erosiona a gran escala, se pierde el material que rodea las pilas y estribos. Esta pérdida disminuye la resistencia del puente ante la fuerza del agua y otros factores, lo que lo hace más vulnerable durante crecidas o lluvias intensas (Huarcaya, 2023).

❖ **Aumento de tensiones en las estructuras:**

La modificación del lecho del río cambia la forma en que el puente distribuye las cargas. Esto genera un aumento de tensiones internas, que pueden producir microgrietas o daños acumulativos por fatiga en los materiales, aumentando el riesgo de fallas estructurales (Huarcaya, 2023).

Figura 2

Distribución de tensiones bajo una cimentación



Fuente. (Huarcaya, 2023)

❖ **Cambios en el flujo del agua alrededor del puente:**

Cuando la socavación y la erosión modifican el entorno inmediato de los soportes del puente, también alteran la forma en que fluye el agua a su alrededor. Estas alteraciones pueden hacer que el flujo se vuelva más turbulento, generando remolinos y vórtices más intensos. Con el tiempo, este flujo más agresivo acelera la pérdida de material del lecho del río, creando un ciclo continuo de deterioro (Huarcaya, 2023).

❖ **Aumento en los costos de mantenimiento:**

Los daños generados por la socavación y la erosión no solo comprometen la estructura, sino que también suponen un gasto considerable en mantenimiento y reparaciones. Para proteger los soportes, se deben aplicar soluciones como revestimientos con roca o el uso de materiales geotextiles, lo que implica inversiones significativas y trabajos periódicos (Huarcaya, 2023).

❖ **Impacto en el tránsito y en la seguridad pública:**

Cuando un puente sufre daños por estos fenómenos, a menudo se hace necesario cerrarlo temporalmente para evaluar su estado y realizar reparaciones. Esto interrumpe el tránsito y puede afectar gravemente la movilidad en zonas que dependen del puente para su conexión. Además, si no se actúa a tiempo, existe un riesgo real para la seguridad de las personas, ya que un fallo estructural repentino podría tener consecuencias graves (Huarcaya, 2023).

❖ **Afectación del entorno natural:**

La socavación y la erosión no solo impactan la infraestructura, también dañan el medio ambiente. Al perder vegetación ribereña o modificar el transporte natural de sedimentos, se alteran los hábitats acuáticos y se puede poner en peligro la biodiversidad local. Además, estos cambios pueden afectar negativamente la calidad del agua y el equilibrio del ecosistema del río (Huarcaya, 2023).

2.2.3.3 ¿CÓMO SE HAN MITIGADO TRADICIONALMENTE ESTOS EFECTOS?

A lo largo del tiempo, los ingenieros han desarrollado distintas estrategias para enfrentar los daños provocados por el agua en los puentes. Estas soluciones se centran en reforzar y proteger las estructuras de soporte frente a la socavación y la erosión, aplicando principios tanto de la ingeniería hidráulica como geotécnica. Entre los métodos más comunes se encuentran:

❖ **Uso de enrocado (revestimiento con roca):**

Esta técnica consiste en colocar grandes piedras alrededor de los soportes del puente y sobre el lecho del río. Las rocas actúan como una barrera que absorbe la energía del agua y reduce su capacidad erosiva. Además, ayudan a mantener el lecho del río estable al evitar que el flujo remueva el sedimento (Velarde, 2022).

❖ **Instalación de geotextiles:**

Los geotextiles son tejidos sintéticos que se colocan entre el suelo y las capas de protección como el enrocado. Su función es permitir que el agua fluya, pero impidiendo que se pierdan las partículas del suelo. Esto ayuda a estabilizar la base de los soportes del puente y es especialmente útil cuando se combina con otras medidas de protección (Velarde, 2022).

Figura 3

Distribución de tensiones bajo una cimentación



Fuente. (Velarde, 2022)

❖ **Deflectores y Espigones:**

Los deflectores y espigones son estructuras de protección diseñadas para desviar el flujo de agua y reducir la velocidad del flujo cerca de los soportes del puente. Estas estructuras pueden ser de diversos materiales, como madera, acero o concreto, y se instalan en el cauce del río para alterar la dirección del flujo y disminuir el potencial de socavación (Velarde, 2022).

❖ **Uso de Pantallas de Chorro (Jet Grouting):**

El jet grouting es una técnica que involucra la inyección de una mezcla de cemento en el suelo alrededor de los soportes del puente para crear columnas de suelo-cemento. Estas columnas aumentan la resistencia del suelo y reducen la permeabilidad, protegiendo así contra la socavación y la erosión. Esta técnica es particularmente útil en suelos sueltos o arenosos (Velarde, 2022).

❖ **Construcción de Diques y Muros de Contención:**

Los diques y muros de contención son estructuras diseñadas para controlar el flujo de agua y proteger las áreas vulnerables alrededor de los puentes. Estos elementos pueden ser construidos de tierra, concreto o materiales

compuestos, y su función principal es prevenir la erosión y la inundación de las áreas adyacentes a los soportes del puente (Velarde, 2022).

❖ **Protección Vegetativa:**

La plantación de vegetación en las riberas del río y alrededor de los soportes del puente es una técnica natural para mitigar la erosión. Las raíces de las plantas ayudan a estabilizar el suelo y a reducir la velocidad del flujo de agua superficial. Esta técnica es ecológica y puede complementar otras medidas de protección (Velarde, 2022).

❖ **Implementación de Válvulas y Barreras de Control de Flujo:**

Las válvulas y barreras de control de flujo son dispositivos mecánicos que se instalan en el cauce del río para regular la velocidad y dirección del flujo de agua. Estos dispositivos pueden ser ajustados según las condiciones hidráulicas para minimizar la socavación y la erosión en los soportes del puente (Velarde, 2022).

La elección de los métodos más adecuados para reducir los efectos hidráulicos sobre los soportes de los puentes depende de varios factores, como las características del cauce del río, el tipo de suelo presente, las condiciones del flujo y los recursos disponibles para la obra. En muchos casos, combinar diferentes técnicas de protección resulta ser una opción más sólida y eficiente, ya que permite enfrentar de mejor manera problemas como la socavación y la erosión que amenazan la estabilidad de estas estructuras (Velarde, 2022).

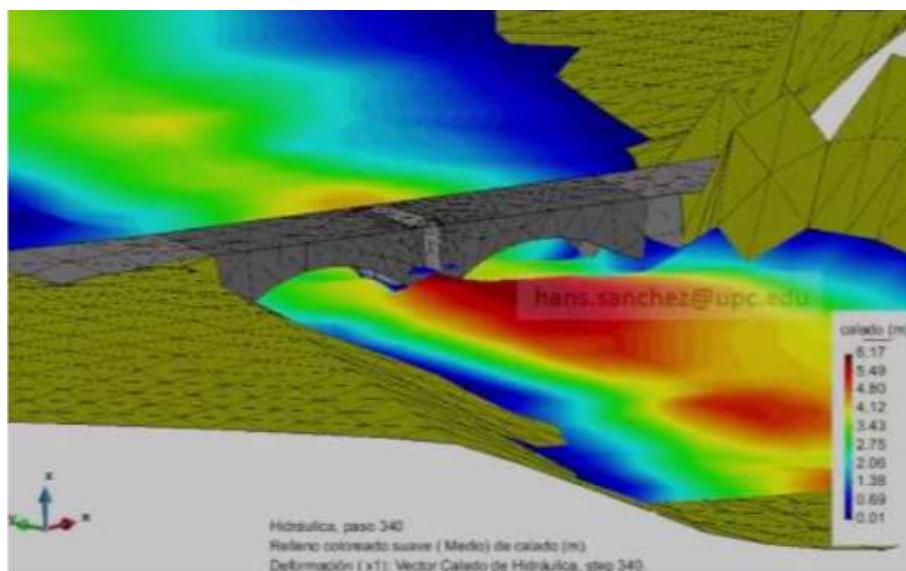
2.2.4 APLICACIÓN DEL MODELO TEDRI-1D7C EN LA MITIGACIÓN DE EFECTOS HIDRÁULICOS

2.2.4.1 PROCEDIMIENTO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO TEDRI-1D7C

La aplicación del modelo TEDRI-1D7C se desarrolla a través de un procedimiento ordenado que abarca varias etapas importantes:

Figura 4

Proceso de aplicación de los modelos hidráulicos.



Fuente. (MINAGRI, 2020)

❖ **Recolección de Datos:**

En esta fase se obtiene información detallada sobre la topografía de la cuenca, las condiciones hidrológicas y las características del suelo. Para ello, se consideran datos como precipitaciones históricas, uso actual del suelo y registros de caudales en el río (MINAGRI, 2020). Esta información es clave para entender el comportamiento del sistema hídrico y establecer las condiciones iniciales del modelo.

❖ **Configuración del Modelo:**

Una vez recolectados los datos, se procede a configurar el modelo en el software especializado. Este paso incluye definir los parámetros iniciales y dividir la cuenca en subcuenca y tramos de río, lo que permite representar con mayor detalle las características del área de estudio (MINAGRI, 2020).

❖ **Calibración y Validación:**

Aquí se ajustan los parámetros del modelo hasta que los resultados simulados coincidan con los datos observados en campo. Posteriormente, se valida el modelo utilizando un conjunto distinto de datos para asegurar que sea confiable bajo diferentes condiciones (MINAGRI, 2020).

❖ **Simulación de Escenarios:**

En esta etapa se prueban distintos escenarios, como lluvias intensas o cambios en el uso del suelo. Esto permite evaluar cómo se comporta el sistema ante eventos extremos y qué tan efectivas podrían ser diferentes medidas de mitigación, como diques, zonas de retención o mejoras en el drenaje (MINAGRI, 2020).

❖ **Análisis de Resultados:**

Se analizan los datos generados por las simulaciones para identificar zonas de alto riesgo. Se elaboran mapas de inundación, perfiles hidráulicos y otros gráficos que facilitan la interpretación de los resultados y ayudan en la planificación de medidas concretas (MINAGRI, 2020).

❖ **Implementación de Medidas:**

Finalmente, con base en el análisis realizado, se plantean e implementan las medidas más adecuadas para mitigar los impactos. Además, el modelo sigue siendo útil luego de la intervención, ya que permite monitorear los efectos de las soluciones aplicadas y ajustar la gestión del agua en el tiempo (MINAGRI, 2020).

2.2.4.2 INTEGRACIÓN DEL MODELO CON DATOS HIDROLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS

La precisión del modelo TEDRI-1D7C depende en gran parte de la calidad y correcta integración de los datos hidrológicos y geotécnicos. Este proceso busca reflejar las condiciones reales de la cuenca evaluada. (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2019).

❖ **Datos Hidrológicos:**

Se recopila información de estaciones meteorológicas e hidrométricas sobre lluvias, caudales y niveles de agua en la cuenca. Estos datos permiten calibrar el modelo y simular cómo se comporta el flujo de agua bajo diferentes condiciones climáticas (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2019) .

❖ **Datos Geotécnicos:**

En esta parte se analizan las propiedades del suelo, como la permeabilidad, la capacidad de infiltración y la estructura interna. Para ello, se pueden realizar ensayos de campo y análisis de laboratorio, lo cual ayuda a entender la respuesta del terreno frente a la lluvia y la escorrentía (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2019).

❖ **Procesamiento de Datos:**

Los datos recolectados se procesan utilizando herramientas de análisis estadístico y geoespacial. Con ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se mapean las variables sobre modelos digitales del terreno (DEM), mapas de uso del suelo y otras capas que permiten representar de forma precisa la cuenca (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2019).

❖ **Configuración del Modelo:**

Con toda esta información, se configura el modelo incluyendo las propiedades hidráulicas de los cauces, las características del terreno y las capacidades de infiltración del suelo. Esto permite simular cómo se desplaza el agua, considerando tanto la superficie como el subsuelo (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2019).

❖ **Calibración y Validación:**

Como en toda modelación, se ajustan los parámetros hasta que los resultados coincidan con observaciones reales. Luego se valida el modelo con datos distintos para confirmar su exactitud en diferentes escenarios (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2019).

❖ **Análisis y Planificación:**

Los resultados del modelo permiten identificar zonas vulnerables y diseñar estrategias de mitigación adecuadas, como obras de protección, planes de manejo del suelo o sistemas de alerta temprana (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2019).

2.2.4.3 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Estas etapas son clave para evaluar cómo se comportaría la cuenca en distintas situaciones y para definir acciones efectivas de prevención.(SENAMHI, 2021).

❖ Simulación de Escenarios:

Se crean distintos escenarios que combinan variables como la intensidad de lluvias, el uso del suelo y las condiciones del terreno. El modelo TEDRI-1D7C permite simular el flujo del agua en cada caso, ayudando a prever posibles riesgos de inundación u otros impactos (SENAMHI, 2021).

❖ Configuración de Parámetros:

Durante la simulación, se ajustan parámetros como las tasas de precipitación, los coeficientes de escorrentía y las propiedades del suelo, basándose en datos históricos o pronósticos meteorológicos. Esto garantiza que los escenarios sean lo más realistas posible (SENAMHI, 2021).

❖ Análisis de Resultados:

Una vez realizadas las simulaciones, se analizan los datos obtenidos para identificar patrones, zonas críticas y posibles puntos de falla. Se generan mapas y gráficos que permiten visualizar claramente los efectos de cada escenario (SENAMHI, 2021).

❖ Evaluación de Medidas de Mitigación:

Con los resultados en mano, se evalúa qué tan efectivas serían distintas medidas, como la construcción de diques o áreas de retención. Esta información es útil para optimizar las decisiones técnicas y priorizar las acciones más eficientes (SENAMHI, 2021).

❖ Informe de Resultados:

Finalmente, se elabora un informe que resume los principales hallazgos, incluye recomendaciones para la

gestión de riesgos y propone posibles ajustes al modelo o nuevas líneas de investigación(SENAMHI, 2021).

2.3 DEFINICIONES CONCEPTUALES

Información Topográfica: Describe el relieve del terreno, incluyendo alturas, pendientes y formas. Es clave para representar correctamente el entorno en estudios hidráulicos y diseño de obras (Vargas, 2023).

Mecánica de Suelos: Analiza las propiedades físicas del suelo, como cohesión, densidad y capacidad de carga. Estos datos ayudan a evaluar la estabilidad de estructuras frente al agua (Fernández, 2022).

Parámetros Hidrológicos: Incluyen variables como caudal, lluvia y nivel del agua. Son esenciales para entender el comportamiento del agua y alimentar modelos hidráulicos (Gómez, 2024).

Parámetros Morfodinámicos: Estudian las características del cauce, como la forma del lecho y el transporte de sedimentos, necesarios para simular la evolución del río (Soto, 2023).

Modelo Matemático TEDRI-1D7C: Herramienta computacional que permite simular el comportamiento hidráulico y de sedimentos en ríos, útil para prever efectos sobre estructuras (Martínez, 2024).

Condiciones de Frontera: Son parámetros definidos en los límites del modelo hidráulico que controlan cómo se comporta el flujo dentro del sistema analizado (Romero, 2022).

Efectos Hidráulicos: Incluyen erosión, sedimentación y cambios en el flujo causados por el agua al interactuar con estructuras, afectando su funcionamiento (Soto, 2023).

Soportes de Puentes: Sostienen el puente y transmiten cargas al suelo. Deben diseñarse considerando las fuerzas del agua para evitar daños o fallos (Vargas, 2023).

Simulación de Escenarios: Consiste en probar distintas condiciones dentro del modelo para analizar cómo responderían las estructuras ante eventos extremos (Castañeda, 2022).

Mitigación de Efectos: Son medidas diseñadas para reducir los impactos negativos del agua sobre infraestructuras, mejorando su resistencia y funcionamiento (Gómez, 2024).

Condiciones de frontera: Restricciones impuestas en los bordes del dominio del modelo, necesarias para resolver ecuaciones y simular fenómenos físicos. (Vega, 2018)

Efectos hidráulicos en soportes de puentes: Fuerzas del agua que impactan en los apoyos del puente, influyendo en su durabilidad y estabilidad. (González M. T., 2020)

Información topográfica: Datos detallados del relieve y superficie de una zona. Son fundamentales para diseñar obras civiles correctamente. (Rojas, 2017)

Mecánica de suelos: Estudia cómo se comportan los suelos bajo cargas. Es base para diseñar cimentaciones seguras y eficientes. (Torres, 2019)

Modelo matemático hidromorfodinámico: Simula el flujo del agua y los sedimentos en ríos, útil para prever cambios y planificar intervenciones. (Martínez J. L., 2021)

Parámetros hidrológicos: Describen el ciclo del agua mediante variables como lluvia, escorrentía y evaporación, claves para la gestión hídrica. (Pérez R. A., 2016)

Parámetros morfodinámicos: Indican cómo cambia la forma del río con el tiempo, incluyendo transporte de sedimentos y variaciones del cauce. (Ramírez S. E., 2015)

Puente Daniel Alomía Robles: Infraestructura vial ubicada en Huánuco. Es clave para la conectividad y ha sido evaluada por sus riesgos hidráulicos. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2022)

Recopilación de información topográfica: Proceso de obtención y análisis de datos sobre la superficie terrestre, esencial para el diseño y planificación de obras civiles. (López C. J., 2018)

Simulación de condiciones de frontera: Aplicación de restricciones en modelos matemáticos para replicar comportamientos reales en sistemas físicos, como flujos en ríos. (Hernández, 2020)

2.4 HIPÓTESIS

H1: Si se aplica el modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C, entonces se reducirán los impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco - 2025.

2.5 VARIABLES

2.5.1 VARIABLE DEPENDIENTE

Impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles: Esta es la variable que se mide para evaluar el impacto del empleo del modelo matemático, es decir, cómo la aplicación del modelo influye en la reducción o manejo de los efectos hidráulicos en los soportes del puente.

2.5.2 VARIABLE INDEPENDIENTE

Modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C: Esta es la variable que se manipula o controla para observar sus efectos sobre la variable dependiente.

2.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES (DIMENSIONES E INDICADORES)

Tabla 1

Operacionalización de variables

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	TÉCNICAS DE MEDICIÓN
Impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles	Variable dependiente	Reducción de impactos negativos de fenómenos hidráulicos en los soportes del puente.	Evaluación de la reducción o control de efectos hidráulicos en los soportes del puente.	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción en la erosión de los soportes. • Estabilidad de los pilares 	<ul style="list-style-type: none"> • Comparación de resultados pre y post simulación. • Inspección de campo.
Modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C	Variable independiente	Herramienta de simulación para modelar el comportamiento hidrológico y morfodinámico.	Aplicación del modelo TEDRI-1D7C en la simulación de efectos hidráulicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Configuración del modelo. • Parámetros introducidos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión documental. • Análisis de simulaciones.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

3.1.1 ENFOQUE

Según la metodología de investigación científica, el enfoque cuantitativo se caracterizará por el uso de la recolección y análisis de datos numéricos para explicar fenómenos y probar hipótesis, valiéndose de técnicas estadísticas y herramientas objetivas que permiten medir relaciones entre variables. Este enfoque se aplicará cuando el investigador pretenda establecer relaciones de causa y efecto, bajo condiciones controladas y verificables. En este sentido, la hipótesis si se aplica el modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C, entonces se reducirán los impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco – 2025, corresponderá al enfoque cuantitativo, ya que se basará en la medición y comparación de variables hidráulicas (como presión, velocidad y caudal) antes y después de aplicar el modelo propuesto. Se propondrá una hipótesis que será evaluada utilizando simulaciones matemáticas y análisis estadísticos. Esto permitirá comprobar si realmente se reduce el impacto hidráulico, aportando evidencia empírica. Este enfoque busca mantener la seriedad del estudio, asegurando que los resultados puedan repetirse y aplicarse en otros casos similares. (Salinas Salazar, 2020).

3.1.2 ALCANCE O NIVEL

Según los principios de la investigación científica, este estudio se ubica dentro del alcance explicativo, ya que busca entender las causas de los fenómenos que se analizan. Esto significa que no solo se describirán los hechos o se identificarán relaciones entre variables, sino que se intentará explicar por qué ocurren. En este caso, la hipótesis planteada — si se aplica el modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C, entonces se reducirán los impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco – 2025 — se enmarca dentro de este nivel, pues busca establecer una relación directa entre el uso del modelo y la disminución de dichos impactos. Se

comprobará si esta relación será causal, al observar el comportamiento de las variables hidráulicas como presión, caudal y empuje, antes y después de aplicar dicho modelo. Mediante simulaciones, validaciones y análisis de datos cuantificables, se explicarán los efectos del modelo sobre la estructura del puente, justificando con evidencia matemática su efectividad. (**Pérez Gonzales, 2019**).

3.1.3 DISEÑO

Según la metodología científica, el diseño longitudinal se definirá como aquel que observará a los sujetos o fenómenos de estudio a lo largo del tiempo, evaluando los cambios que se producen como resultado de la aplicación de una intervención o tratamiento. Este diseño será apropiado cuando se pretenda analizar la evolución de variables dependientes en distintos momentos, permitiendo establecer relaciones de causalidad más sólidas. En el caso de la hipótesis: si se aplica el modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C, entonces se reducirán los impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco – 2025, el estudio pertenecerá al diseño longitudinal, ya que implicará evaluar el comportamiento hidráulico del puente antes y después de aplicar el modelo TEDRI-1D7C, en diferentes escenarios de simulación o periodos de análisis. Este diseño permitirá evidenciar los cambios en variables como presión, velocidad o caudal a lo largo del tiempo, verificando si efectivamente se produce una reducción significativa en los impactos hidráulicos sobre los soportes. El uso de este diseño garantizará un análisis comparativo con base temporal, clave para validar la eficacia del modelo propuesto. (Flores Vega, 2021).

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1 POBLACIÓN

La población en metodología de investigación refiere al conjunto total de individuos, eventos o elementos que serán estudiados en una investigación, y que comparten características específicas. Este conjunto puede estar limitado por criterios espaciales, temporales o temáticos dependiendo del tipo de estudio que se esté desarrollando (Díaz Rojas, 2020).

En el presente trabajo tendrá como población todos los puentes del distrito de Huánuco que se encuentren sobre el río Huallaga, los cuales son: Puente Calicanto y Puente Daniel Alomía Robles.

3.2.2 MUESTRA

La muestra es un subconjunto representativo de la población que será seleccionado para el estudio, permitiendo realizar análisis más detallados y específicos sin necesidad de observar la totalidad de la población. La representatividad es clave para asegurar que los resultados sean generalizables (Díaz Rojas, 2020).

La muestra se limitará específicamente al Puente Daniel Alomía Robles en Huánuco, donde se aplicará el modelo matemático TEDRI-1D7C para la mitigación de los efectos hidráulicos.

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

3.3.1 PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1.1 TÉCNICAS

En esta investigación, se utilizó la observación estructurada como técnica principal de recolección de datos. Esta técnica permitió registrar, de forma sistemática y controlada, los comportamientos hidráulicos del río Huallaga en la zona del Puente Daniel Alomía Robles. También se aplicó la simulación computacional como técnica complementaria, mediante la cual se procesaron distintos escenarios hidráulicos generados por el modelo TEDRI-1D7C. Ambas técnicas facilitaron el análisis comparativo antes y después de aplicar el modelo matemático, contribuyendo a validar la hipótesis planteada. (Ramírez López, 2019).

3.3.1.2 INSTRUMENTOS

Se emplearon varios instrumentos durante la recolección de datos. Entre ellos, el checklist de observación permitió registrar los parámetros hidráulicos observables en campo, como nivel del agua, turbulencia y erosión en los soportes del puente. Asimismo, se utilizó el software especializado TEDRI-1D7C, que sirvió como instrumento computacional para procesar variables hidrodinámicas mediante simulación. También se recurrió a fichas técnicas para documentar información secundaria sobre el comportamiento del río y los eventos históricos de socavación en el puente. Estos instrumentos aseguraron la precisión y organización de los datos recolectados. (Ramírez López, 2019).

3.3.2 PARA LA PRESENTACIÓN DE DATOS

Tabla 2

Instrumento de recolección de datos

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	INSTRUMENTO	FRECUENCIA DE RECOLECCIÓN	RESPONSABLE	NOTAS
Datos Hidrológicos	Caudal del río, nivel del agua, velocidad de flujo	Estaciones hidrométricas	Diaria	Técnico Hidráulico	Asegurar calibración y mantenimiento
Datos de Sedimentación	Concentración de sedimentos, tipo de sedimentos	Sensores de turbidez, muestreos de sedimentos	Semanal	Técnico de Laboratorio	Muestras representativas del área
Datos de Erosión	Cambios en la geomorfología, niveles de erosión	Fotogrametría, mediciones topográficas	Mensual	Geomorfólogo	Documentar condiciones y variaciones
Datos de Simulación	Resultados del modelo TEDRI-1D7C, escenarios simulados	Software de modelado (TEDRI-1D7C)	Según avance del proyecto	Investigador Principal	Validar y verificar precisión
Datos Históricos	Información previa sobre el comportamiento del río y el puente	Revisión de documentos históricos y estudios previos	Al inicio del proyecto	Investigador	Revisar y comparar con datos actuales

Nota. Esta tabla ayudará a organizar el proceso de recolección de datos, asegurando que todos los aspectos importantes sean cubiertos y gestionados adecuadamente.

3.3.3 PARA EL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

Se realizó mediante un enfoque cuantitativo. Se procesaron los datos obtenidos a través de simulaciones hidráulicas antes y después de aplicar el modelo TEDRI-1D7C, utilizando herramientas estadísticas descriptivas para identificar cambios en variables como velocidad del flujo, presión, nivel de socavación y distribución de esfuerzos. Posteriormente, se interpretaron los resultados relacionándolos con criterios técnicos de estabilidad estructural y dinámica fluvial. El análisis permitió verificar si existió una reducción significativa en los impactos hidráulicos sobre los soportes del puente, contrastando los datos simulados con registros históricos y parámetros de referencia hidráulica. Esta etapa fue clave para confirmar la eficacia del modelo propuesto como medida de mitigación, aportando conclusiones fundamentadas en evidencia empírica.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

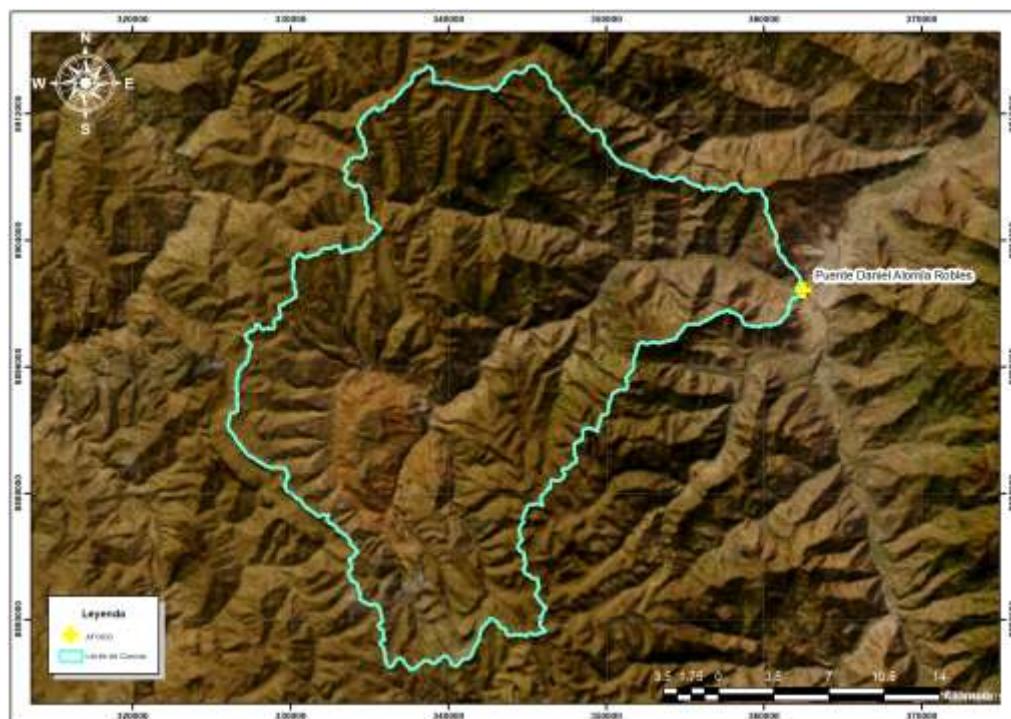
4.1 PROCESAMIENTO DE DATOS

4.1.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDROLÓGICOS Y MORFODINÁMICOS

Para la estimación de modelo hidrológico completo se planteó inicialmente para la investigación la realización de un modelo hidrológico completo de la cuenca, para este caso al río Higueras que atraviesa el puente Daniel Alomía Robles.

Figura 5

Identificación de los límites de la cuenca del río Higueras

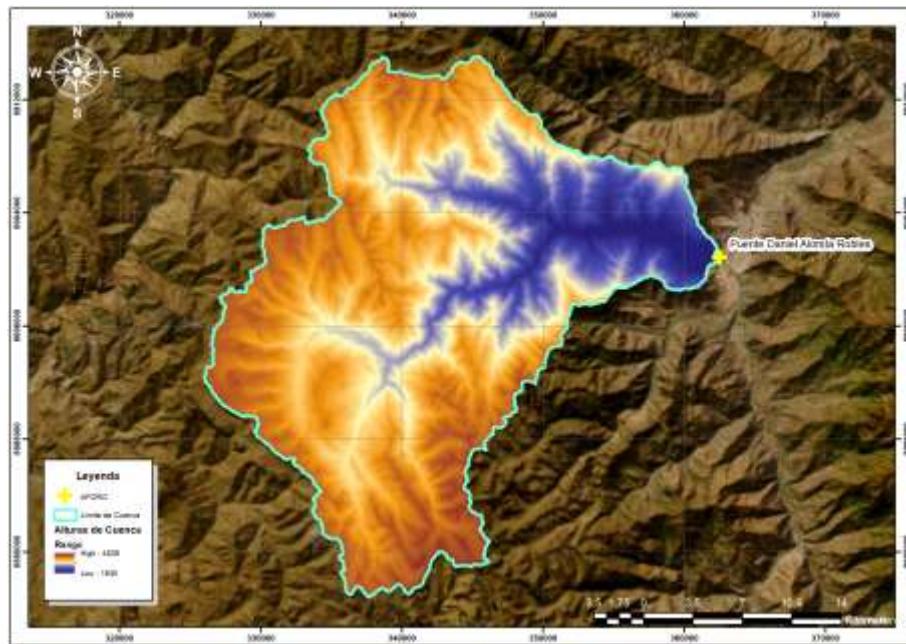


Nota. Delimitación de la cuenca a partir de los valores de cotas extremos.

Se identifica que el modelo tomó como punto de aforo la ubicación del puente Daniel Alomía Robles con la finalidad de identificar las características geométricas y morfológicas de la cuenca, de ella preliminarmente se pudo determinar que el área es de 703.31 km² y el perímetro es aproximadamente 194.83 km.

Figura 6

Modelo de elevación digital de la cuenca

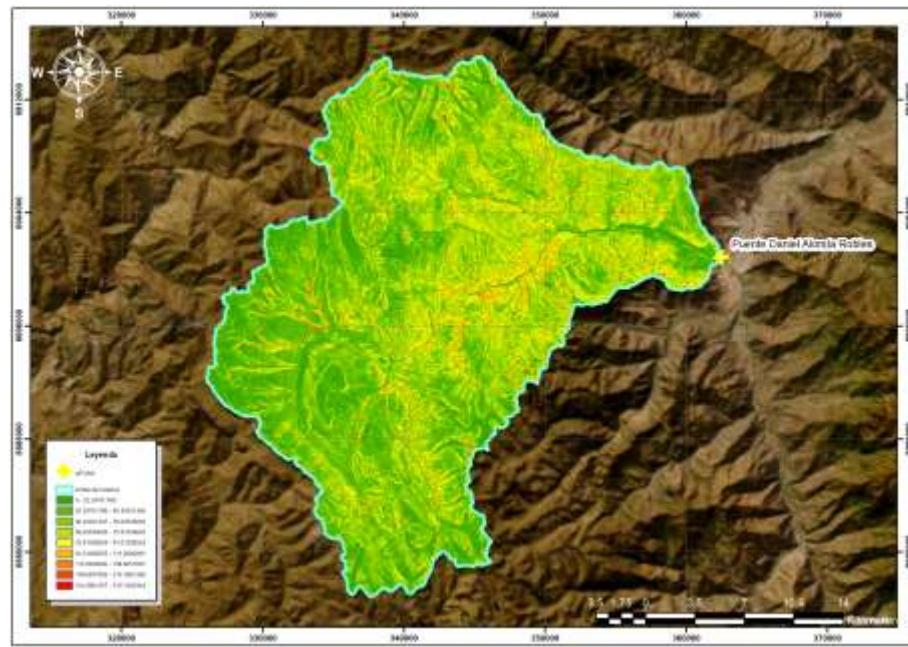


Nota. Recorte de modelo de elevación correspondiente a la cuenca.

Con la identificación de los límites de la cuenca del río Higueras teniendo como punto de aforo la ubicación del puente Daniel Alomía Robles se pudo delimitar la cuenca a fin de poder obtener el modelo de elevación digital que se presenta en la figura anterior, de ella se pudo identificar que la cuenca presenta altitudes que van desde los 1,930 msnm a los 4,526 msnm.

Figura 7

Modelo de pendientes de cuenca

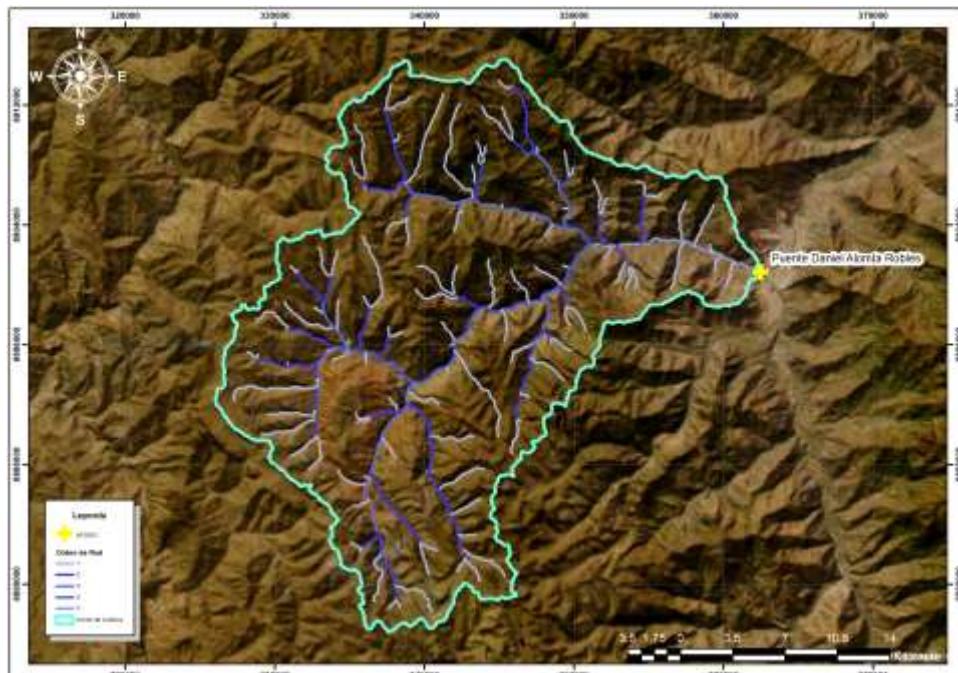


Nota. Identificación de pendientes porcentuales de la cuenca.

El modelo de elevación digital de la cuenca facilitó la determinación de las pendientes a partir de una aplicación porcentual, en ella se pudo determinar que la cuenca presenta una predominancia entre los 5 primeros rangos establecidos para la misma identificando que las pendientes más pronunciadas solo se presentan en la parte de la cuenca alta y con poca predominancia.

Figura 8

Red hídrica de la cuenca

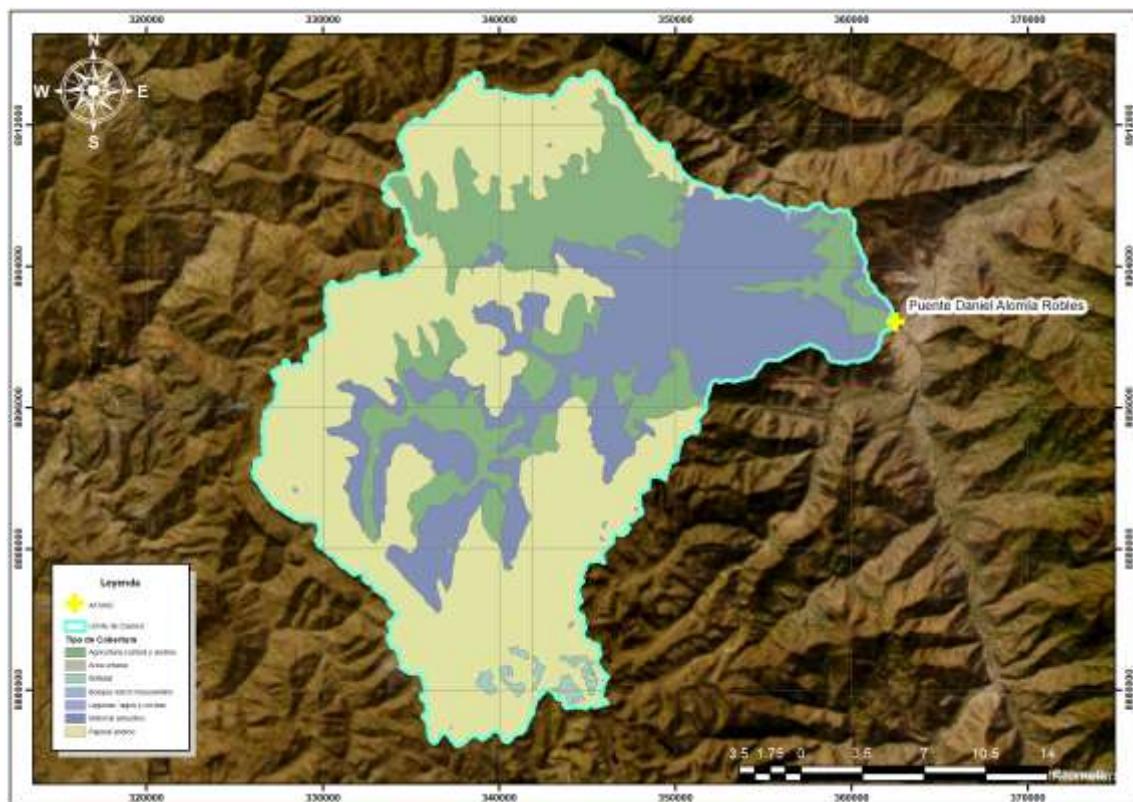


Nota. Identificación de los cauces principales de la cuenca

Con la determinación de las pendientes y del modelo de elevación digital de la cuenca y aplicando las herramientas del software ArcGIS se pudo identificar que la cuenca presenta un orden de río de 5to grado las cuales fueron interpoladas con la capa de pendientes para determinar un valor promedio en la pendiente promedio de la red hídrica identificada.

Figura 9

Identificación de coberturas vegetales de la cuenca

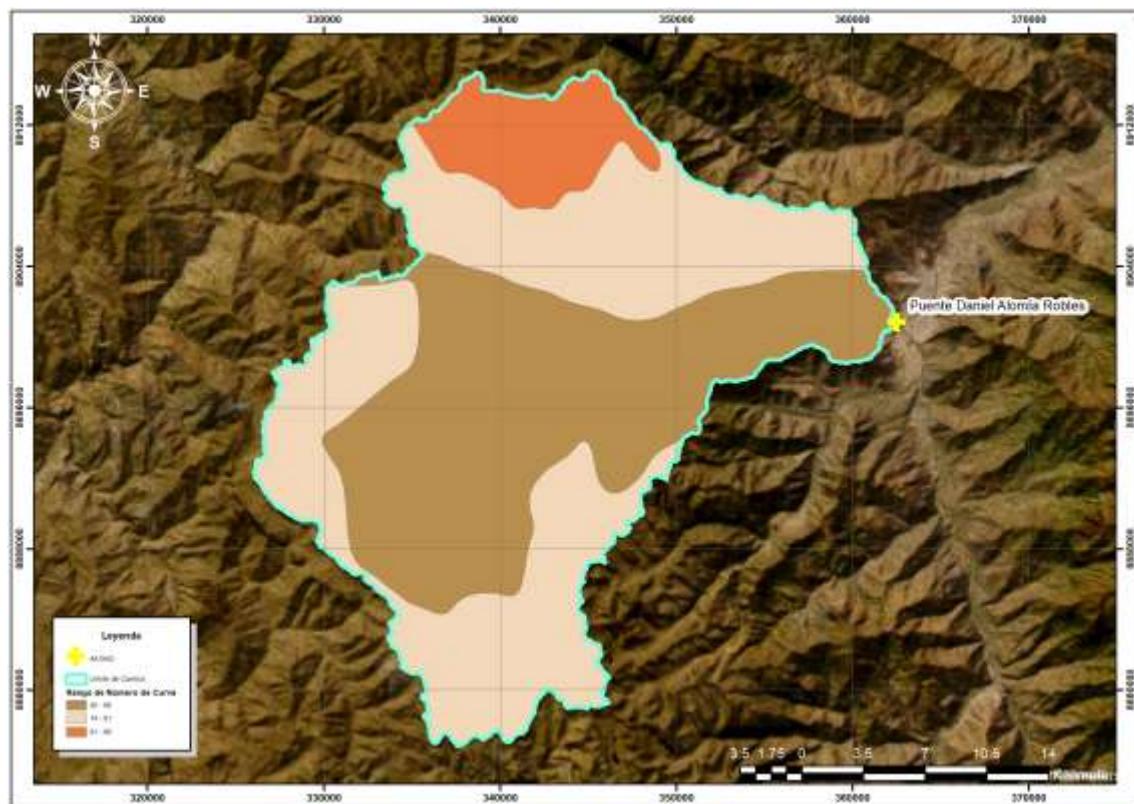


Nota. Identificación del tipo de cobertura de la cuenca.

Los límites de la cuenca identificados en la primera figura sirvieron de base para determinar los tipos de coberturas que presenta la cuenca a partir de la clasificación que elaboró el Ministerio del Ambiente para el país, en dicha delimitación se pudo identificar que la cuenca presenta un total de 07 tipos de cobertura, las cuales se denominan como: Agricultura andina, Área urbana, Bofedal, Bosque relictico mesoandino, Componentes hídricos, Matorral arbustivo y pajonal andino.

Figura 10

Rangos de número de curva para la cuenca



Nota. Rangos de número de curva para la cuenca.

Con la caracterización de los suelos al igual que la identificación del tipo de cobertura vegetal de la cuenca se pudo identificar que para la cuenca se identificó un total de 03 rangos, los cuales van entre los valores de 55 a 66, 74 a 81 y 81 a 90.

Tabla 3

Determinación de parámetros básicos de la cuenca

Categoría	Descripción	Valor
Características Geométricas	Superficie	703.31 km ²
	Perímetro	194.825 km
	Ancho Máximo	23.33 km
Altitudes Extremas	Longitud Máxima	34.55 km
	Altitud Mínima	1930.06 msnm
Coordenadas del Centroide	Altitud Máxima	4526 msnm
	X (Este)	343,284.38 m
	Y (Norte)	8,896,742.72 m
Datos de Elevación	Z (Altitud)	3657.68 msnm
	Altitud Media	3657.68 msnm
	Altitud Predominante	4999.5 msnm
	Altitud Mediana	3561.59 msnm

Pendiente	Pendiente Promedio de la Cuenca	9.21%
Datos Hidrográficos	Longitud del Canal Principal	13.34 km
	Orden de la Red Hidrográfica	5
	Longitud Total de la Red Hidrográfica	382.93 km
	Pendiente Promedio de la Red Hidrográfica	17.37%

Nota. Determinación de valores característicos de la cuenca.

Se realizó una caracterización geomorfológica de la cuenca, la cual tuvo una superficie de 703.31 km² y un perímetro de 194.825 km. El ancho máximo alcanzó los 23.33 km, mientras que su longitud máxima fue de 34.55 km. En cuanto a las altitudes extremas, se determinó que la cota mínima estuvo a 1930.06 msnm y la cota máxima a 4526 msnm. El centroide se localizó con coordenadas X en 343,284.38 m, Y en 8,896,742.72 m, y una altitud de 3657.68 msnm. La altitud media de la cuenca fue de 3657.68 msnm, mientras que la altitud predominante alcanzó los 4999.5 msnm, y la altitud mediana se ubicó en 3561.59 msnm. Además, se calculó que la pendiente promedio de la cuenca fue de 9.21%. Por otro lado, la longitud del cauce principal fue de 13.34 km, la red hidrográfica perteneció al orden 5, con una longitud total de 382.93 km, y la pendiente promedio de la red hidrográfica alcanzó un 17.37%.

Tabla 4

Determinación de parámetros de forma

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Factor de Forma	F	0.68	S/N
Índice de Compacidad (Gravelious)	K	2.06	S/N
Lado Mayor del Rectángulo Equivalente	L	89.56	km
Lado Menor del Rectángulo Equivalente	I	7.85	km
Densidad de Drenaje	Dd	0.54	u/km ²
Índice de Pendiente	Ip	0.31	S/N

Nota. Determinación de valores característicos de la cuenca.

Se determinaron los parámetros geomorfológicos de la cuenca, los cuales fueron los siguientes: el Factor de Forma (F) resultó ser 0.68, sin unidad; el Índice de Gravelious o Compacidad (K) fue de 2.06, también

sin unidad; el Rectángulo Equivalente, compuesto por el Lado Mayor (L), presentó un valor de 89.56 km, mientras que el Lado Menor (l) alcanzó los 7.85 km. En términos de la Densidad de Drenaje (Dd), se calculó en 0.54 u/km², y el Índice de Pendiente (Ip) fue de 0.31, sin unidad.

Tabla 5

Identificación de las coberturas vegetales de la cuenca

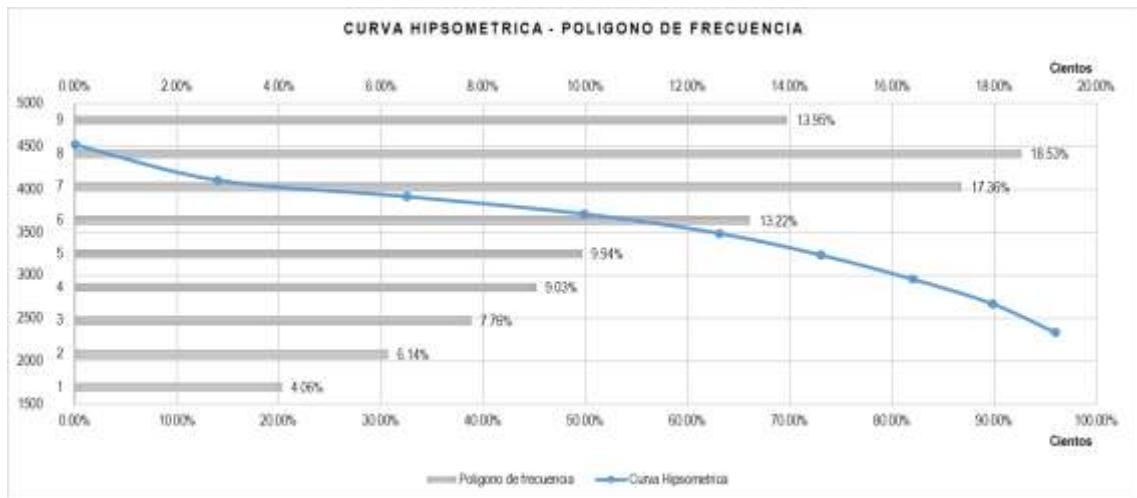
Identificación de Coberturas Vegetales				
Tipo	Área	% Área	Pendiente Promedio	
Agricultura costera y andina	154.48	21.96%	48.16 %	
Area urbana	0.36	0.05%	11.90 %	
Bofedal	5.43	0.77%	23.99 %	
Bosque relicto mesoandino	0.30	0.04%	61.58 %	
Lagunas, lagos y cochas	0.44	0.06%	16.81 %	
Matorral arbustivo	202.50	28.79%	56.88 %	
Pajonal andino	339.80	48.31%	42.23 %	

Nota. Interpretación de los valores de cobertura vegetal en la cuenca.

La tabla mostró la distribución de las coberturas vegetales y el uso del suelo en la región, destacando que el pajonal andino ocupó la mayor parte, con un 48.31% del área total y una pendiente promedio de 42.23%. El matorral arbustivo representó el 28.79% del área, con una inclinación promedio más alta, de 56.88%. La agricultura costera y andina cubrió el 21.96% del área, desarrollándose en terrenos con una pendiente promedio de 48.16%. Las coberturas menores incluyeron los bofedales, que abarcaban el 0.77% del área con una pendiente de 23.99%, mientras que las lagunas, lagos y cochas ocuparon el 0.06% con una pendiente de 16.81%. El área urbana fue limitada, con solo un 0.05% del área total y una pendiente baja de 11.90%. Finalmente, el bosque relicto mesoandino cubrió solo el 0.04% del territorio, pero presentó la mayor inclinación, con una pendiente promedio del 61.58%.

Figura 11

Curva hipsométrica y polígono de frecuencia



Nota. Determinación de las características altitudinales de la cuenca.

El gráfico de la Curva Hipsométrica y el Polígono de Frecuencia describe la distribución altitudinal de la cuenca, mostrando que la mayor parte de su área se concentra entre los 4000 y 4500 msnm, con frecuencias de 18.53% y 17.36%, respectivamente. Las elevaciones entre 3000 y 4000 msnm también son significativas, con porcentajes entre 7.76% y 9.94%, mientras que las áreas por debajo de los 2000 msnm representan solo el 4.06%. La curva hipsométrica, que ilustra la variación de la altitud en función del área acumulada, sugiere una cuenca con una topografía mixta, donde las pendientes varían de moderadamente inclinadas a escarpadas, indicando que las altitudes más elevadas dominan gran parte del relieve.

Tabla 6

Estimación del número de curva

Estimación del Número de Curva					
Rango		Media	Área	% Área	Área * Media
Inferior	Superior				
55	66	60.50	304.06	0.43	18395.77
74	81	77.50	335.33	0.48	25987.78
81	90	85.50	63.92	0.09	5465.26
Número de Curva Promedio					70.88

Nota. Valores de estimación para el número de curva de la cuenca.

La estimación del Número de Curva se calculó para diferentes rangos de valores, con tres categorías principales. En el rango de 55 a

66, se obtuvo una media de 60.50, con un área de 304.06 unidades, que representó el 0.43% del total y produjo un producto de área y media de 18,395.77. Para el rango de 74 a 81, la media fue de 77.50, el área alcanzó las 335.33 unidades, lo que representó el 0.48% del área total, generando un valor de 25,987.78 para el producto de área y media. En el rango de 81 a 90, la media fue de 85.50, con un área más pequeña de 63.92 unidades, representando el 0.09% del área total, con un producto de 5,465.26. Finalmente, el Número de Curva Promedio se estimó en 70.88.

Tabla 7

Identificación de los valores de precipitación para la cuenca

AÑO	REGISTRO PLUVIOMÉTRICO ESTACIÓN CANCHAN (SENAMHI)												MÁXIMO
	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	
1988										6.20	3.70	19.80	19.80
1989	19.50	12.20	13.40	7.60	4.20	3.00	1.00	8.60	12.60	18.00	6.60	0.00	19.50
1990	17.10	7.50	9.00	12.50	13.00	8.60	0.20	2.00	5.50	14.50	15.00	7.80	17.10
1991	5.60	12.40	0.00	5.60	3.00	3.80	0.00	0.00	7.00	15.00	12.70	16.50	16.50
1992	8.70	12.00	11.00	7.50	3.00	2.60		18.40	3.30	6.00			18.40
1993		10.80	22.00	16.30	19.00	4.70	1.00	1.30	9.10	9.40	15.40	10.10	22.00
1994	14.00	15.80		18.00	11.60	1.30	0.70			13.30	8.20		18.00
1995	15.00	11.30	14.00	8.50		2.00	0.00	0.00	7.40	4.50	5.50	13.30	15.00
1996	8.60	8.50	13.40	17.70	7.70		1.00	1.50	4.80	6.40	10.20	11.20	17.70
1997	22.70	7.00	15.00	4.20	5.00	9.50	0.00	3.80	3.30	7.00	7.00	11.20	22.70
1998	16.80	15.20	24.80	2.90	3.30	1.20	0.00	0.50	5.40	3.20	22.20	14.00	24.80
1999	16.90	19.50	18.80	21.90	6.20	4.40	2.20	1.00	7.00	5.00	11.00	12.20	21.90
2000	12.80	9.00	11.60	6.20	2.80	6.80	3.00	12.10	8.30	14.50	7.00	20.00	20.00
2001	19.00	7.50	16.10	19.00	3.00	2.20	4.50	2.30	5.00	8.80	41.50	17.80	41.50
2002	13.30	12.30	29.60	20.10	5.80	0.70	8.40	4.10	4.00	21.30	4.80	14.40	29.60
2003	14.50	14.40	10.60	12.60	2.60	0.00	0.00	5.00	7.70	29.00	16.00	18.70	29.00
2004	7.30	19.40	33.20	9.70	9.00	5.00	4.00	4.60	8.90	12.80	4.70	15.20	33.20
2005	12.40	25.20	16.80	7.00	0.50	0.00	2.50	16.00	4.50	11.80	9.90	33.00	33.00
2006	31.60	17.10	19.50	9.00	4.50	4.80	1.00	1.40	6.30	26.80	19.50	15.40	31.60
2007	16.80	1.40	9.80	6.00	6.10	0.00	2.20	3.00	4.10	22.10	8.60	19.70	22.10
2008	24.40	19.60	10.90	14.20	3.90	1.10	1.60	1.60	17.30	9.50	24.50	28.20	28.20
2009	27.00	19.80	18.40	17.50	23.70	14.60	4.30	0.70	3.70	11.80	8.20	15.60	27.00
2010	4.00	16.40	23.10	12.30	5.00	0.00	2.00	3.20	12.50	14.50	16.90	10.90	23.10
2011	11.50	7.60	18.40	7.10	14.20	0.00	3.50	3.50	2.00	18.20	13.70	24.00	24.00
2012	17.50	18.10	13.70	13.20	3.00	1.50	4.20	3.10	2.40	16.80	17.60	23.30	23.30
2013	9.20	12.80	21.00	12.70	1.80	6.30	6.20	15.30	3.20	12.30	17.80	14.30	21.00

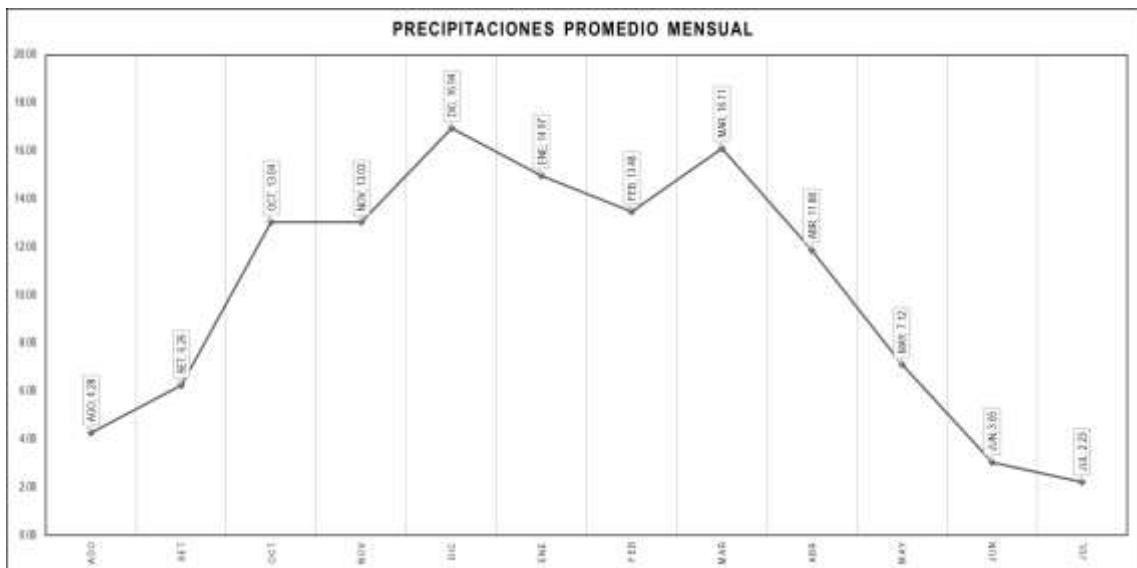
2014	14.70	19.00	17.50	16.70	17.50	1.30	2.80	0.00	10.50	27.40	8.80	16.00	27.40
2015	9.40	17.40	15.20	24.50	9.40	0.00	0.40	1.20	4.40	7.40	15.00	9.50	24.50
2016	9.60	10.50	3.80	1.00	0.00	2.20	2.30	2.20	9.70	14.90	20.30	20.30	
2017	9.40	13.30	13.50	6.30	10.90	0.00	3.40	3.40	3.00	8.00	10.90	41.80	41.80
2018	19.50	12.40	16.40	15.80	5.90								19.50
PROMEDIO	14.97	13.48	16.11	11.88	7.12	3.05	2.23	4.28	6.26	13.04	13.03	16.94	
DESV. EST.	6.44	5.11	6.57	5.87	5.74	3.55	2.07	5.06	3.64	6.96	7.70	8.11	
MÁXIMO	31.60	25.20	33.20	24.50	23.70	14.60	8.40	18.40	17.30	29.00	41.50	41.80	
MÍNIMO	4.00	1.40	0.00	2.90	0.50	0.00	0.00	0.00	2.00	3.20	3.70	0.00	
Nº Datos	28.00	30.00	29.00	30.00	29.00	28.00	28.00	28.00	28.00	30.00	29.00	28.00	

Nota. Registro de lluvias estación Canchan.

En la identificación de la cuenca del río Higueras se pudo identificar que la estación Canchán se encuentra en lectura en el cauce del río Higueras contando con un total de 31 años de registro siendo el óptimo para la estimación de las características de precipitaciones de la cuenca siendo que está bajo la jurisdicción del SENAMHI. Los valores resaltados son registros faltantes los cuales serán estimados con los valores de precipitación promedio mensual.

Figura 12

Promedios mensuales de precipitación



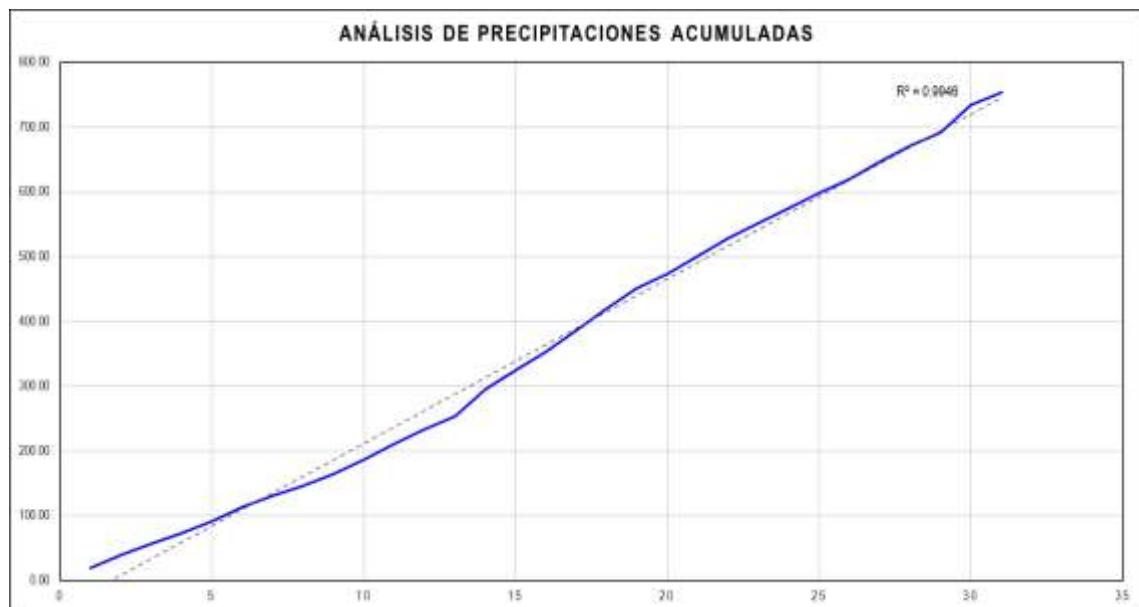
Nota. Determinación de los valores promedio en la estación Canchan.

Con el registro preliminar de precipitaciones se pudo determinar los valores de precipitación promedio mensual partiendo del reordenamiento del año hidrológico, obteniendo así que el pico de precipitación se da en el mes de diciembre con una precipitación promedio de 16.34 mm y un valor mínimo de precipitación promedio de 2.23 mm que corresponde al

mes de julio. Con dichos valores de promedio se completaron los registros de precipitación con la finalidad de tener un comportamiento de precipitaciones más ajustado al modelo.

Figura 13

Análisis de precipitaciones acumuladas

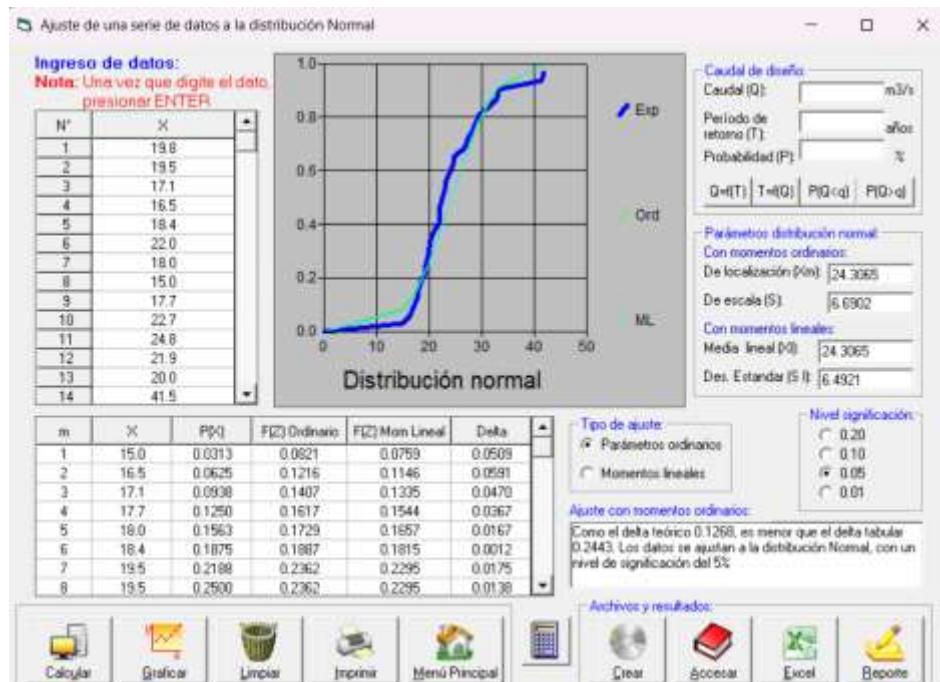


Nota. Análisis doble masa con datos completos.

Con los registros completos de precipitación se aplicó la metodología de las precipitaciones máximas acumuladas a fin de identificar los quiebres anómalos en los registros, de ella se pudo identificar que planteando una línea recta la serie presente algunos quiebres, pero determinando el factor R^2 el ajuste que presenta es del 99.46% siendo este un valor confiable para la serie de registros considerados en la investigación.

Figura 14

Determinación de ajuste con Distribución Normal

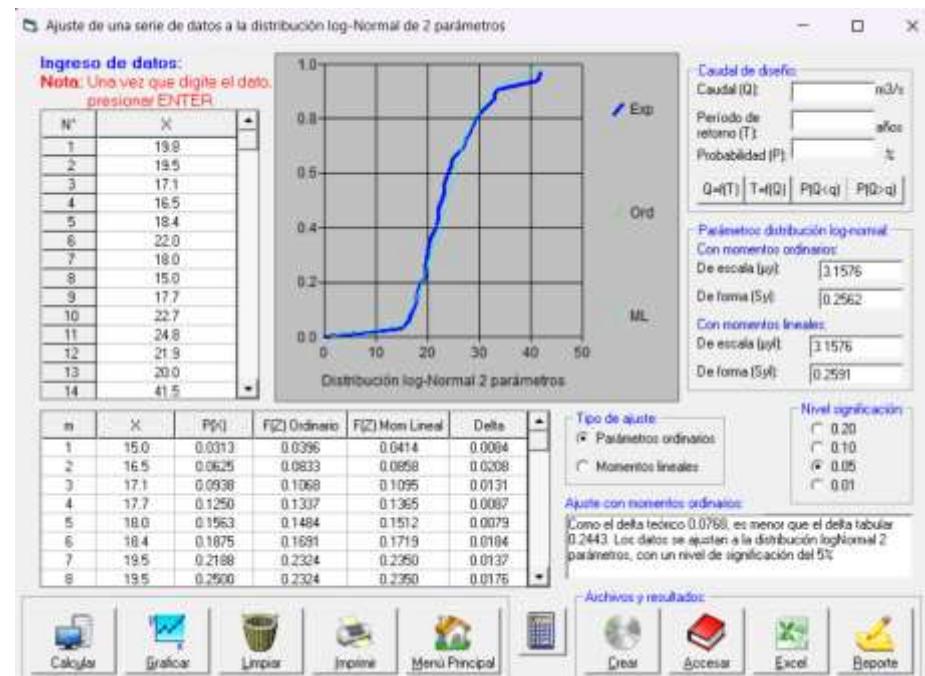


Nota. Aplicación de la distribución normal en la serie muestral en Hidroesta 2.

Se determinó que el valor de ajuste para los valores de precipitaciones máximas en la estación Canchan es de 0.1268 con una distribución Normal.

Figura 15

Determinación de ajuste con Distribución Log-Normal 2 parámetros

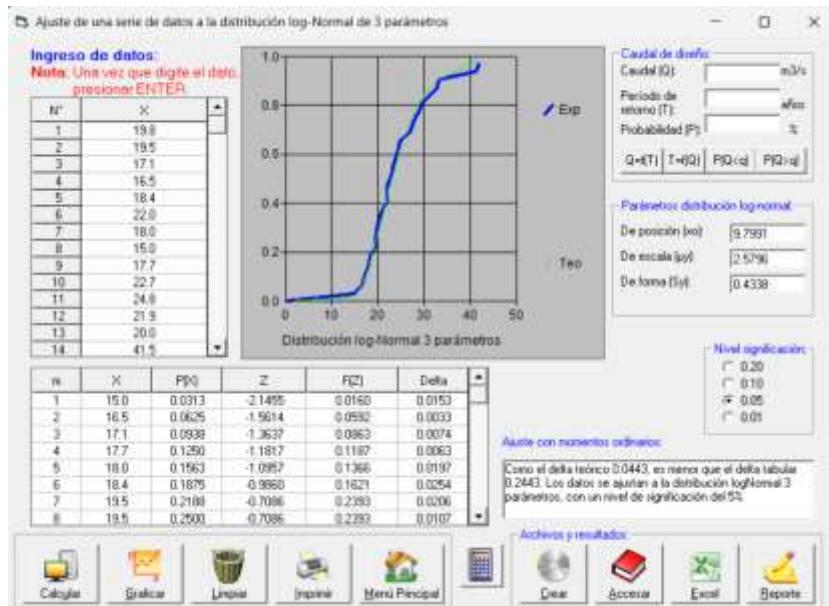


Nota. Aplicación de la distribución log-normal en la serie muestral en Hidroesta 2.

Se determinó que el valor de ajuste para los valores de precipitaciones máximas en la estación Canchan es de 0.0768 con una distribución Log-Normal de 2 parámetros.

Figura 16

Determinación de ajuste con Distribución Log-Normal 3 parámetros

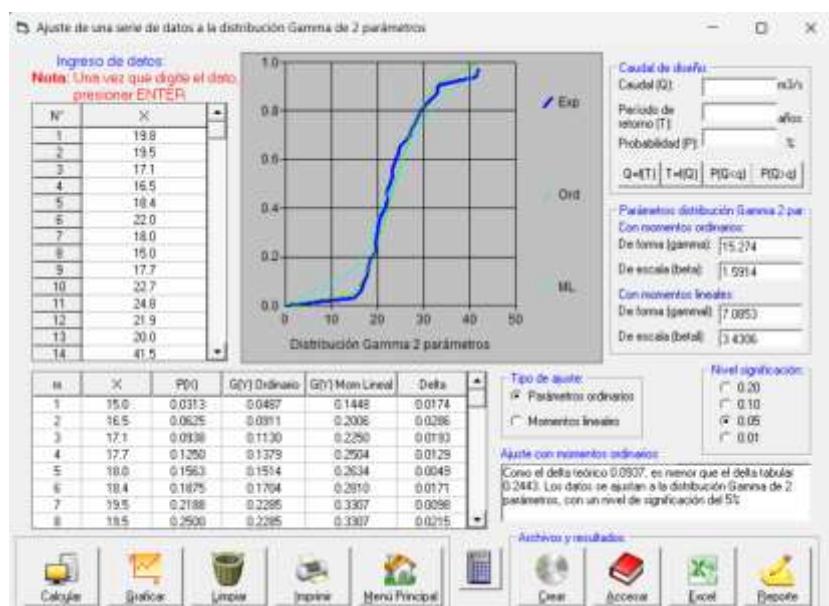


Nota. Aplicación de la distribución log-normal en la serie muestral en Hidroesta 2.

Se determinó que el valor de ajuste para los valores de precipitaciones máximas en la estación Canchan es de 0.0443 con una distribución Log-Normal de 3 parámetros.

Figura 17

Determinación de ajuste con Distribución Gamma 2 parámetros

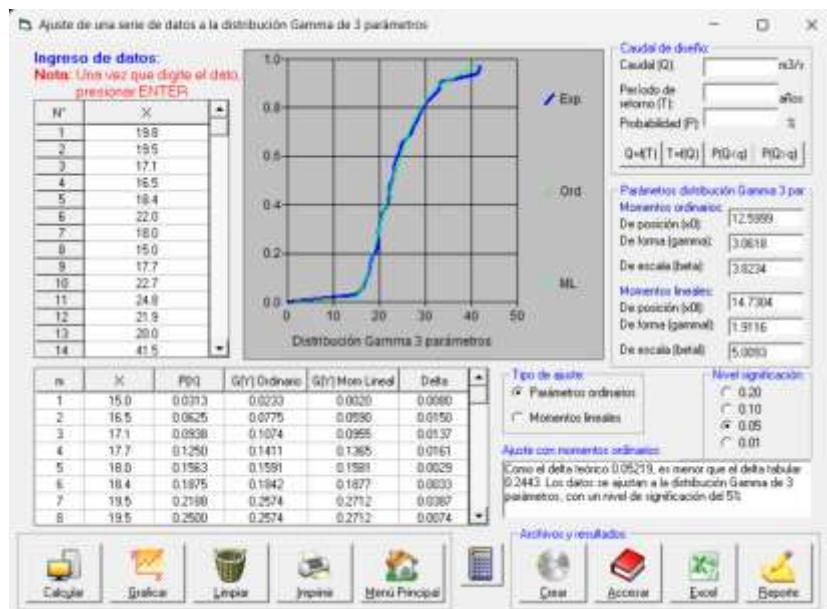


Nota. Aplicación de la distribución gamma en la serie muestral en Hidroesta 2.

Se determinó que el valor de ajuste para los valores de precipitaciones máximas en la estación Canchan es de 0.0937 con una distribución Gamma 2 parámetros.

Figura 18

Determinación de ajuste con Distribución Gamma 3 parámetros

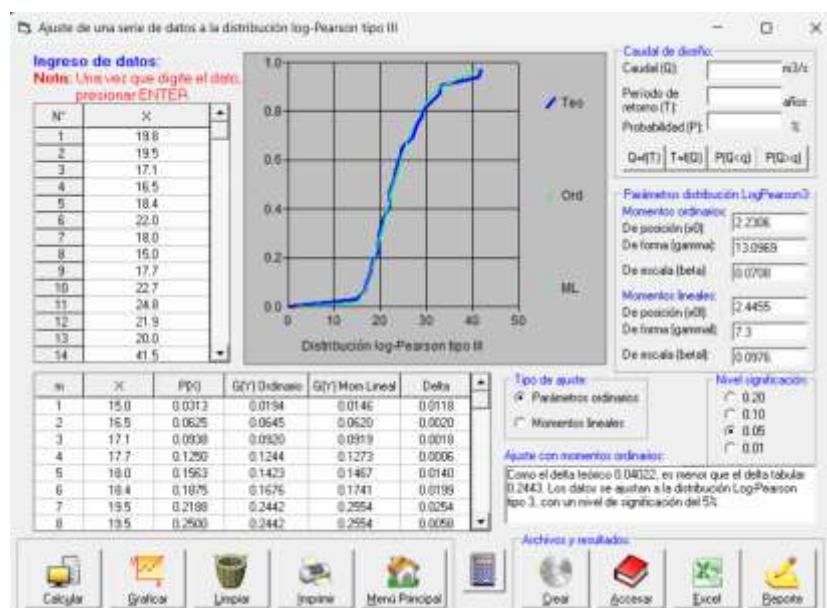


Nota. Aplicación de la distribución gamma en la serie muestral en Hidroesta 2.

Se determinó que el valor de ajuste para los valores de precipitaciones máximas en la estación Canchan es de 0.05219 con una distribución Gamma 3 parámetros.

Figura 19

Determinación de ajuste con Distribución Log-Pearson Tipo III

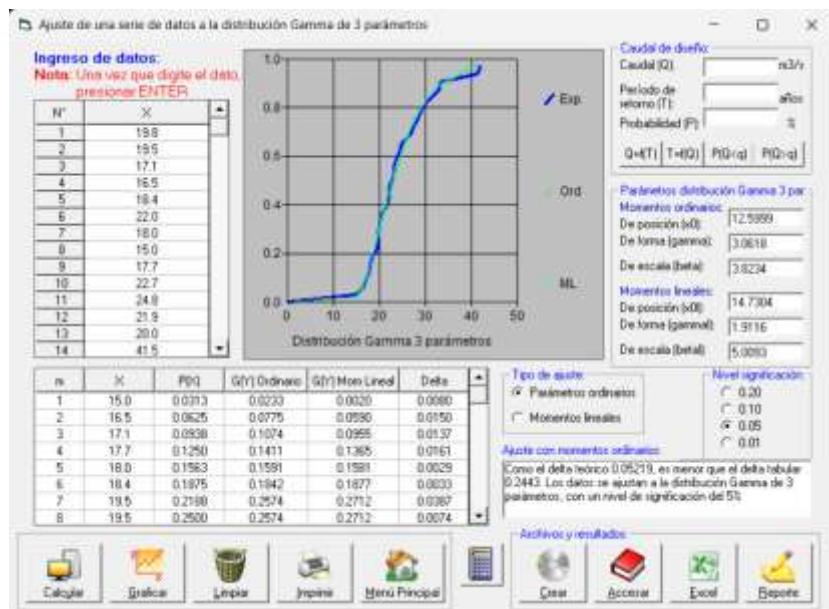


Nota. Aplicación de la distribución log-peerson en la serie muestral en Hidroesta 2.

Se determinó que el valor de ajuste para los valores de precipitaciones máximas en la estación Canchan es de 0.04022 con una distribución Log-Pearson Tipo III.

Figura 20

Determinación de ajuste con Distribución Gumbel

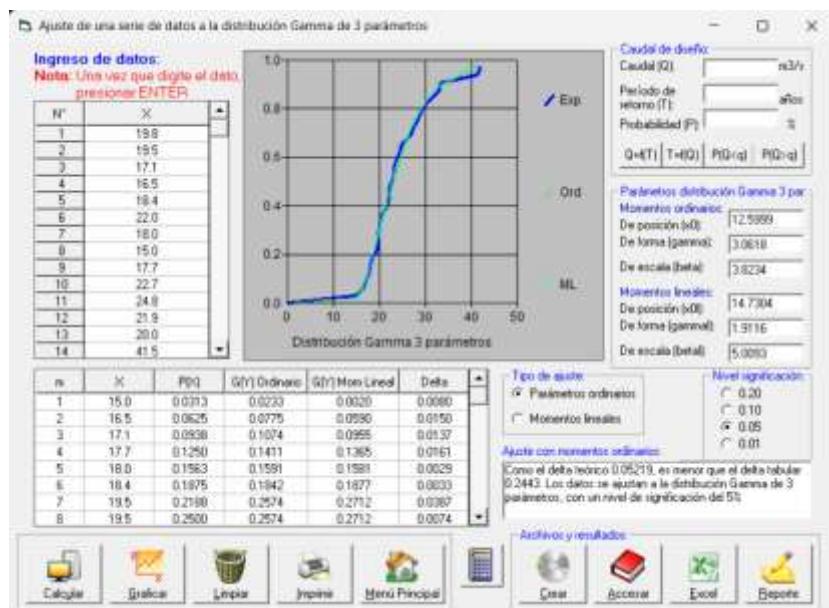


Nota. Aplicación de la distribución gumbel en la serie muestral en Hidroesta 2.

Se determinó que el valor de ajuste para los valores de precipitaciones máximas en la estación Canchan es de 0.0564 con una distribución Gumbel.

Figura 21

Determinación de ajuste con Distribución LogGumbel



Nota. Aplicación de la distribución log-gumbel en la serie muestral en Hidroesta 2.

Se determinó que el valor de ajuste para los valores de precipitaciones máximas en la estación Canchan es de 0.0675 con una distribución LogGumbel.

Tabla 8

Identificación de la mejor serie de distribución

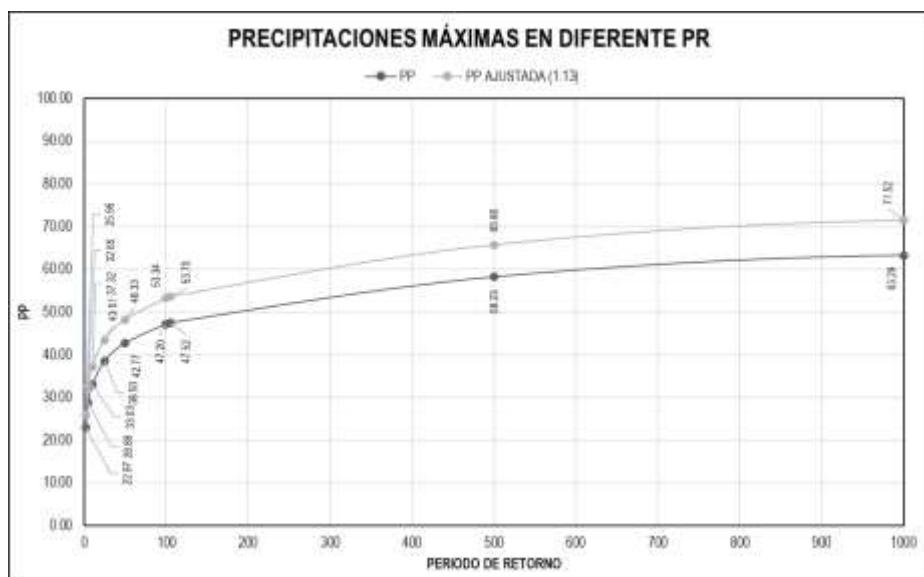
Distribución	Prueba de Ajuste	Parámetro de variación
Normal		0.1268
Log Normal de 2 Parámetros		0.0768
Log Normal de 3 Parámetros		0.0443
Gamma 2 Parámetros		0.0937
Gamma 3 Parámetros		0.05219
Log Pearson Tipo III		0.04022
Gumbel		0.0564
Log Gumbel		0.0675

Nota. Estimación de los valores numéricos de ajuste para la serie de precipitaciones.

Con los valores de delta de comparación estimados en el software Hidroesta 2 se pudo determinar los valores de ajuste para cada distribución tomada en cuenta, en la comparación entre las distribuciones aplicadas se pudo estimar que la distribución Normal es la que peor ajuste tiene, mientras que la distribución Log Pearson Tipo III presenta el mejor ajuste a la serie de datos teniendo un parámetro de evaluación menor de 0.04022.

Figura 22

Estimación de los valores de lluvia proyectados

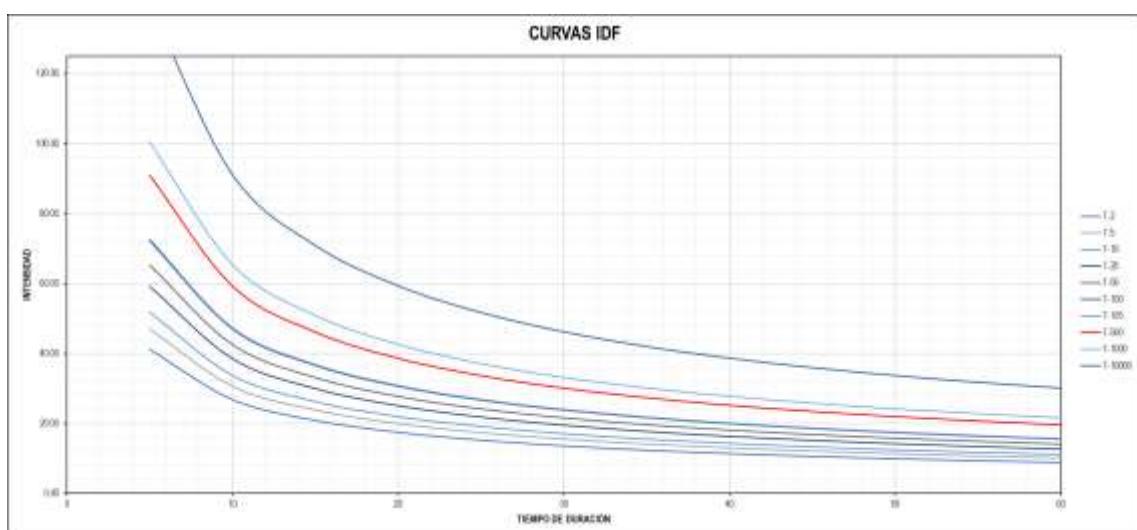


Nota. Estimación de valores de precipitaciones en diferentes períodos de retorno.

Se estimó para la caracterización de las lluvias la aplicación de la distribución Log Pearson Tipo III, de ella se pudo estimar los siguientes valores de precipitación: 22.97mm, 28.89mm, 33.03mm, 38.50mm, 42.77mm, 47.20mm, 47.52mm, 58.23mm, 63.29mm y 79.79mm, para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 105, 500, 1000 y 10000 años respectivamente, a dichos valores se le aplicó un valor de reajuste del 1.13 con la finalidad de ajustar los valores de precipitación que no fueron registrados o que fueron mal recolectados en el proceso de la estación meteorológica seleccionada de ello se calcularon los siguientes valores de precipitación ajustada: 25.96mm, 32.65mm, 37.32mm, 43.51mm, 48.33mm, 53.34mm, 53.70mm, 65.80mm, 71.52mm y 90.16mm respectivamente.

Figura 23

Curvas IDF para la cuenca

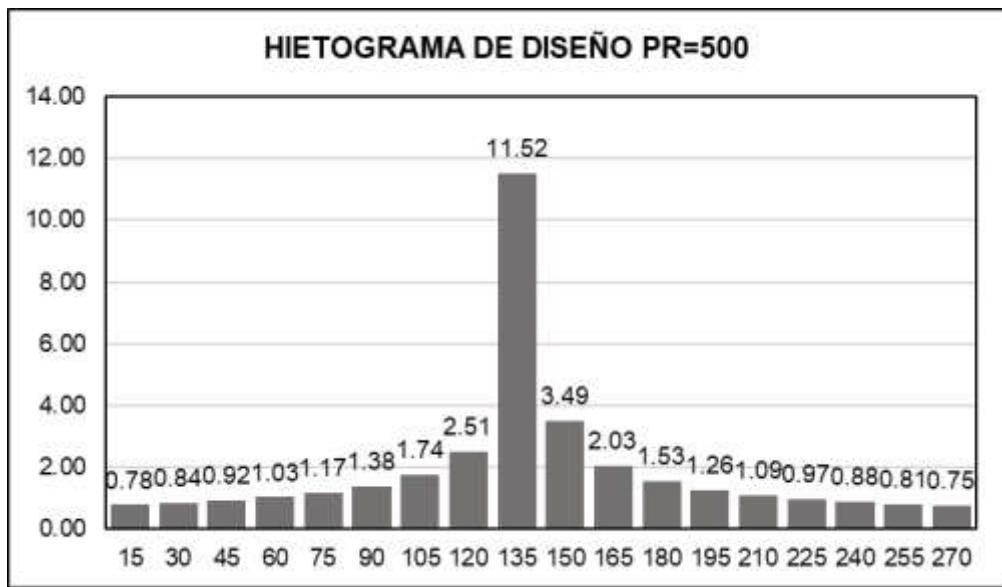


Nota. Determinación de la curva IDF para el cálculo del hietograma de diseño.

Con la estimación de los valores de precipitación de la cuenca se pudo determinar cada uno de los valores de intensidad y duración para cada periodo de retorno aplicable a la cuenca, para la elaboración del modelo TEDRI solo se aplicó el valor de intensidad para un periodo de retorno de 500 años.

Figura 24

Hietograma de diseño

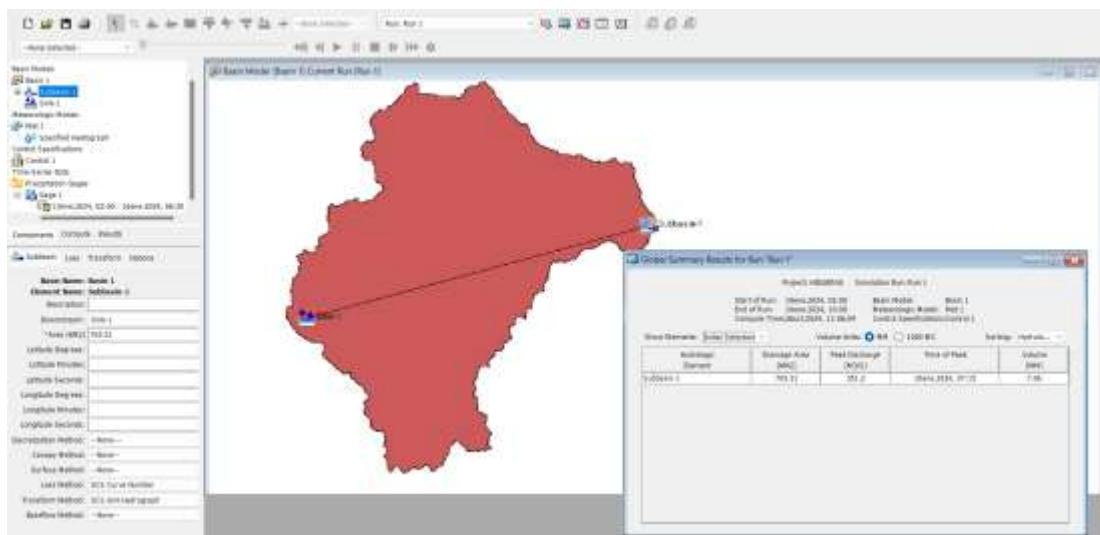


Nota. Determinación de los valores de intensidad para el hietograma aplicable a la cuenca.

En la determinación de las intensidades para diferentes duraciones de la cuenca se pudo determinar que el pico de intensidad se da a los 135 minutos con un valor de 11.52 mm/h, para su estimación se calculó que el tiempo de concentración de la cuenca es de 4 horas y media (270 min) y para el diseño del hietograma se tomaron lapsos de registro cada 15 min.

Figura 25

Modelo Hec-HMS para la cuenca



Nota. Modelo hidrológico Hec-HMS

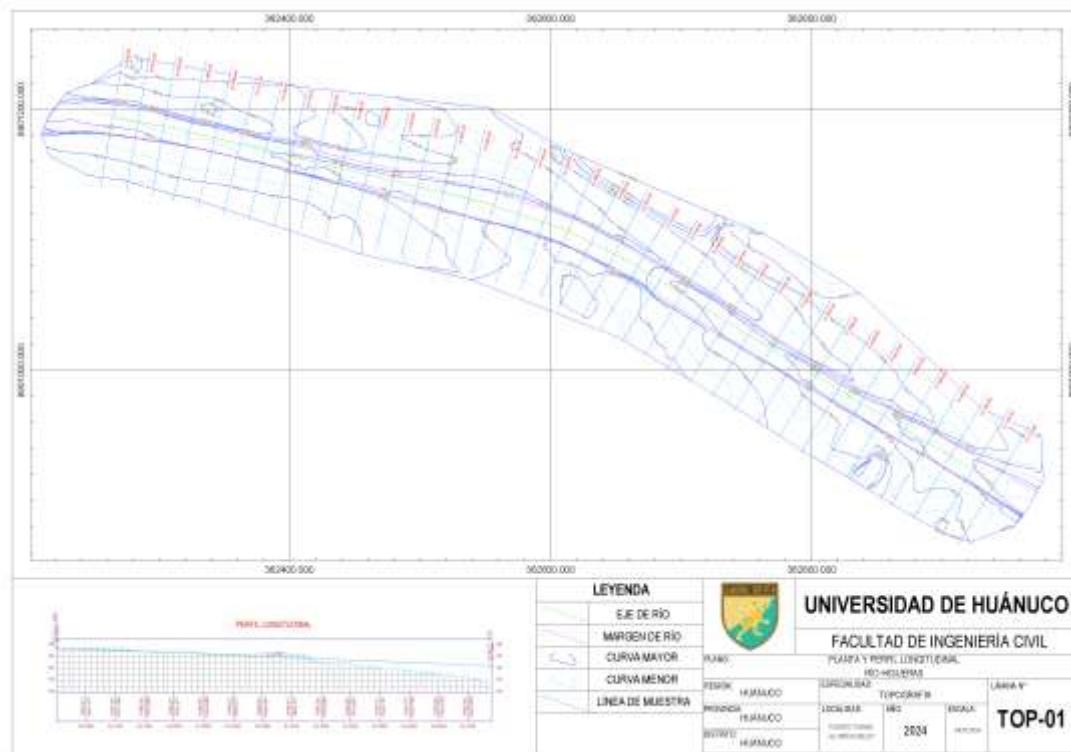
Con la identificación del hietograma de precipitaciones para la cuenca del río Higueras se pudo determinar a partir del modelo hidrológico SCS número de curva aplicado en el software Hec-HMS que

para un periodo de retorno de 500 años el valor del caudal es de 351.20 m³/s.

4.1.2 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA Y DE MECÁNICA DE SUELOS

Figura 26

Plano topográfico de la zona de interés



Nota. Plano topográfico del cauce en el puente Daniel Alomía Robles.

De la caracterización topográfica para la zona de interés se pudo determinar que en total se tuvo un levantamiento de 740 m de cauce del río Higueras, el cauce del levantamiento se pudo determinar que la pendiente estimada para el cauce es de 0.42% de pendiente en promedio, con dicho modelo se aplicará el modelo TEDRI.

Tabla 9

Análisis granulométrico

PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO		
	TAMICES		PORCENTAJE QUE PASA
	DENOMINACIÓN ASTM	ABERTURA (mm)	
	3	75.000	100.000
	2	50.000	100.000
	1 1/2	37.000	100.000
	1	25.000	92.000

3/4	19.000	82.700
3/8	9.500	77.800
N° 4	4.750	75.300
N° 10	2.000	71.600
N° 20	0.850	54.100
N° 40	0.425	20.400
N° 60	0.250	15.100
N° 140	0.106	3.200
N° 200	0.075	2.500

Nota. Caracterización de la muestra granulométrica

Con el proceso de tamizado de la muestra se pudo identificar que la muestra pasa el 100% por el tamiz de 1 ½ pulg. Y solo el 2% de la muestra pasa por el tamiz N°200.

Figura 27

Curva granulométrica



Nota. Curva granulométrica identificada para la muestra.

Con el modelo de curva se pudo determinar que el coeficiente de curvatura es de 1.37 y el coeficiente de uniformidad de la muestra es de 6.55, caracterizando al suelo como de tipo subangular en su muestra gruesa.

Tabla 10

Clasificación de suelo

CLASIFICACIÓN (SUCS)		
SW	ARENA BIEN GRADUADA CON GRAVA	
CLASIFICACIÓN (AASHTO)		
A-1-b	ÍNDICE DE GRUPO	0
DESCRIPCIÓN (AASHTO)		BUENO

Nota. Identificación del tipo de suelo según sus características.

Con la caracterización del suelo a partir de la granulometría y los índices de plasticidad del suelo se pudo identificar que según la

clasificación SUCS el suelo es de tipo SW denominado como arena bien graduada con grava, de la misma forma según la clasificación AASHTO se pudo identificar que es de tipo A-1-b teniendo un índice de grupo 0, obteniendo una clasificación de buena.

Tabla 11

Contenido de humedad de la muestra

DESCRIPCIÓN	C-01
PESO EN SUELO HÚMEDO	2305.00 g
PESO EN SUELO SECO	2065.50 g
PESO DE LA CAPSULA	117.00 g
PESO DEL AGUA	239.50 g
PESO DE SUELO SECO	1888.50 g
% DE HUMEDAD	12.68%

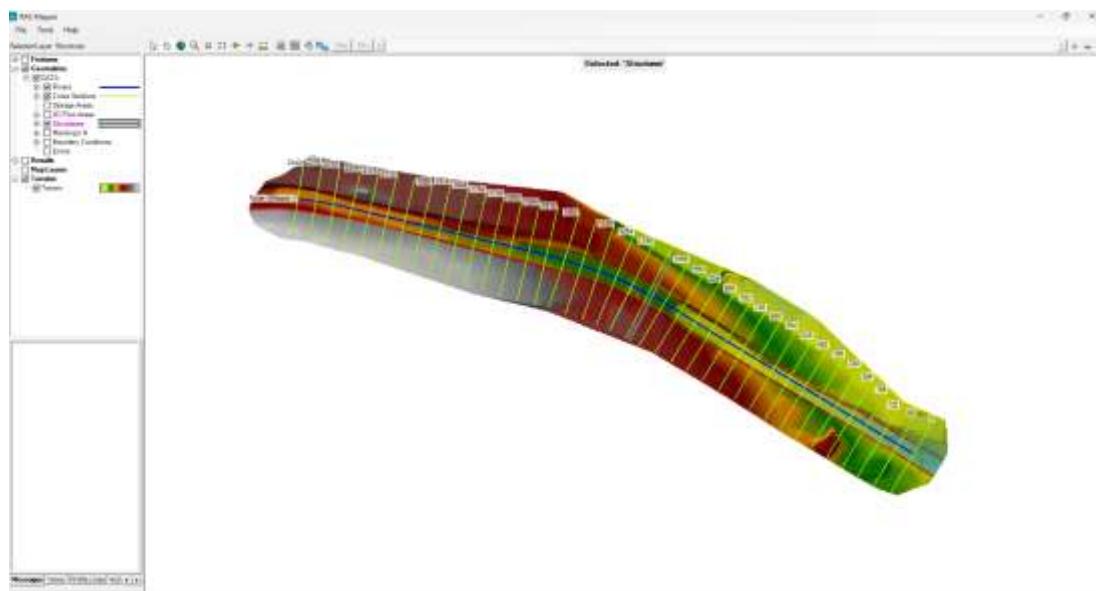
Nota. Características de humedad de la muestra.

Con la muestra obtenida se procedió a pesar la muestra en húmedo con la cual se pudo identificar que el peso es de 2305.00 g, luego del secado de la muestra es de 20.65.50 g, con el proceso de estimación se pudo identificar que la muestra presenta un contenido de humedad del 12.68%.

4.1.3 MODELO MATEMÁTICO TEDRI-1D7C

Figura 28

Creación del modelo para el análisis TEDRI-1D7C



Nota. Modelamiento básico del terreno Hec-RAS

Para la obtención de los valores de socavación por el Modelo TEDRI-17DC, se colocó la información topográfica en el modelo HEC-

RAS del modelo topográfico en el cual se levantó un tramo de 740 m de cauce en el cual se considera la consideración del modelo del Puente Daniel Alomía Robles.

Figura 29

Modelo de esquemas hidráulicos



Nota. Identificación de elementos hidráulicos.

Con el modelo topográfico se identificaron los elementos que componen el esquema hidráulico del cauce, como el eje principal, las riberas del río y las secciones del cauce que en total serían 66 secciones analizadas.

Figura 30

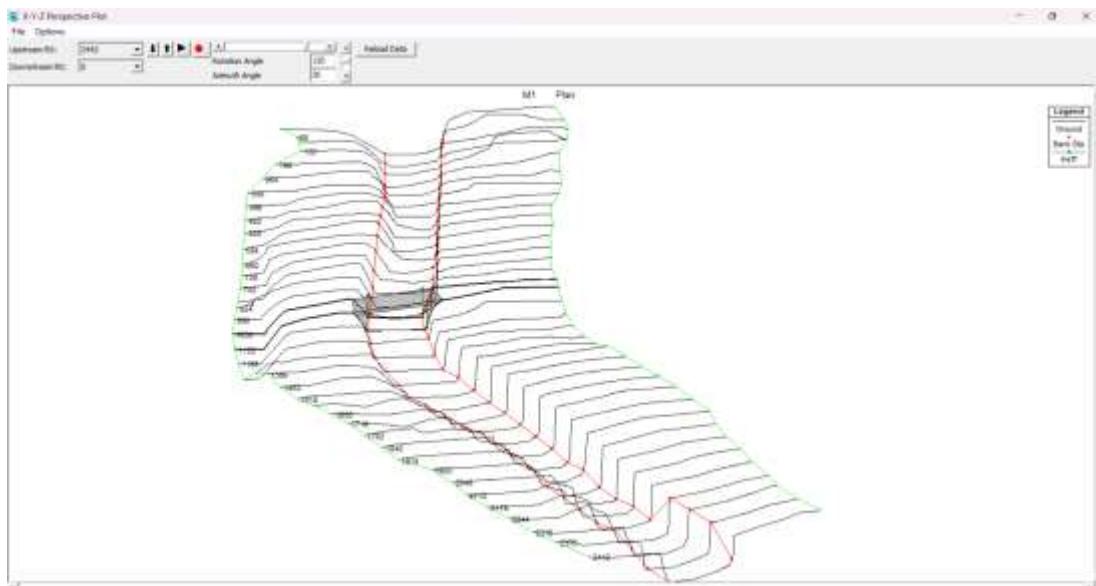
Análisis de rugosidad en los cauces

Number Station	Profundidad (m)	n = d1	n = d2	n = d3
231340	0.24	0.1	0.1	0.1
231341	0.24	0.1	0.1	0.1
231342	0.24	0.1	0.1	0.1
231343	0.24	0.1	0.1	0.1
231344	0.24	0.1	0.1	0.1
231345	0.24	0.1	0.1	0.1
231346	0.24	0.1	0.1	0.1
231347	0.24	0.1	0.1	0.1
231348	0.24	0.1	0.1	0.1
231349	0.24	0.1	0.1	0.1
231350	0.24	0.1	0.1	0.1
231351	0.24	0.1	0.1	0.1
231352	0.24	0.1	0.1	0.1
231353	0.24	0.1	0.1	0.1
231354	0.24	0.1	0.1	0.1
231355	0.24	0.1	0.1	0.1
231356	0.24	0.1	0.1	0.1
231357	0.24	0.1	0.1	0.1
231358	0.24	0.1	0.1	0.1
231359	0.24	0.1	0.1	0.1
231360	0.24	0.1	0.1	0.1
231361	0.24	0.1	0.1	0.1
231362	0.24	0.1	0.1	0.1
231363	0.24	0.1	0.1	0.1
231364	0.24	0.1	0.1	0.1
231365	0.24	0.1	0.1	0.1
231366	0.24	0.1	0.1	0.1
231367	0.24	0.1	0.1	0.1
231368	0.24	0.1	0.1	0.1
231369	0.24	0.1	0.1	0.1
231370	0.24	0.1	0.1	0.1
231371	0.24	0.1	0.1	0.1
231372	0.24	0.1	0.1	0.1
231373	0.24	0.1	0.1	0.1
231374	0.24	0.1	0.1	0.1
231375	0.24	0.1	0.1	0.1
231376	0.24	0.1	0.1	0.1
231377	0.24	0.1	0.1	0.1
231378	0.24	0.1	0.1	0.1
231379	0.24	0.1	0.1	0.1
231380	0.24	0.1	0.1	0.1
231381	0.24	0.1	0.1	0.1
231382	0.24	0.1	0.1	0.1
231383	0.24	0.1	0.1	0.1
231384	0.24	0.1	0.1	0.1
231385	0.24	0.1	0.1	0.1
231386	0.24	0.1	0.1	0.1
231387	0.24	0.1	0.1	0.1
231388	0.24	0.1	0.1	0.1
231389	0.24	0.1	0.1	0.1
231390	0.24	0.1	0.1	0.1
231391	0.24	0.1	0.1	0.1
231392	0.24	0.1	0.1	0.1
231393	0.24	0.1	0.1	0.1
231394	0.24	0.1	0.1	0.1
231395	0.24	0.1	0.1	0.1
231396	0.24	0.1	0.1	0.1
231397	0.24	0.1	0.1	0.1
231398	0.24	0.1	0.1	0.1
231399	0.24	0.1	0.1	0.1
231400	0.24	0.1	0.1	0.1
231401	0.24	0.1	0.1	0.1
231402	0.24	0.1	0.1	0.1
231403	0.24	0.1	0.1	0.1
231404	0.24	0.1	0.1	0.1
231405	0.24	0.1	0.1	0.1
231406	0.24	0.1	0.1	0.1
231407	0.24	0.1	0.1	0.1
231408	0.24	0.1	0.1	0.1
231409	0.24	0.1	0.1	0.1
231410	0.24	0.1	0.1	0.1
231411	0.24	0.1	0.1	0.1
231412	0.24	0.1	0.1	0.1
231413	0.24	0.1	0.1	0.1
231414	0.24	0.1	0.1	0.1
231415	0.24	0.1	0.1	0.1
231416	0.24	0.1	0.1	0.1
231417	0.24	0.1	0.1	0.1
231418	0.24	0.1	0.1	0.1
231419	0.24	0.1	0.1	0.1
231420	0.24	0.1	0.1	0.1
231421	0.24	0.1	0.1	0.1
231422	0.24	0.1	0.1	0.1
231423	0.24	0.1	0.1	0.1
231424	0.24	0.1	0.1	0.1
231425	0.24	0.1	0.1	0.1
231426	0.24	0.1	0.1	0.1
231427	0.24	0.1	0.1	0.1
231428	0.24	0.1	0.1	0.1
231429	0.24	0.1	0.1	0.1
231430	0.24	0.1	0.1	0.1
231431	0.24	0.1	0.1	0.1
231432	0.24	0.1	0.1	0.1
231433	0.24	0.1	0.1	0.1
231434	0.24	0.1	0.1	0.1
231435	0.24	0.1	0.1	0.1
231436	0.24	0.1	0.1	0.1
231437	0.24	0.1	0.1	0.1
231438	0.24	0.1	0.1	0.1
231439	0.24	0.1	0.1	0.1
231440	0.24	0.1	0.1	0.1
231441	0.24	0.1	0.1	0.1
231442	0.24	0.1	0.1	0.1
231443	0.24	0.1	0.1	0.1
231444	0.24	0.1	0.1	0.1
231445	0.24	0.1	0.1	0.1
231446	0.24	0.1	0.1	0.1
231447	0.24	0.1	0.1	0.1
231448	0.24	0.1	0.1	0.1
231449	0.24	0.1	0.1	0.1
231450	0.24	0.1	0.1	0.1
231451	0.24	0.1	0.1	0.1
231452	0.24	0.1	0.1	0.1
231453	0.24	0.1	0.1	0.1
231454	0.24	0.1	0.1	0.1
231455	0.24	0.1	0.1	0.1
231456	0.24	0.1	0.1	0.1
231457	0.24	0.1	0.1	0.1
231458	0.24	0.1	0.1	0.1
231459	0.24	0.1	0.1	0.1
231460	0.24	0.1	0.1	0.1
231461	0.24	0.1	0.1	0.1
231462	0.24	0.1	0.1	0.1
231463	0.24	0.1	0.1	0.1
231464	0.24	0.1	0.1	0.1
231465	0.24	0.1	0.1	0.1
231466	0.24	0.1	0.1	0.1
231467	0.24	0.1	0.1	0.1
231468	0.24	0.1	0.1	0.1
231469	0.24	0.1	0.1	0.1
231470	0.24	0.1	0.1	0.1
231471	0.24	0.1	0.1	0.1
231472	0.24	0.1	0.1	0.1
231473	0.24	0.1	0.1	0.1
231474	0.24	0.1	0.1	0.1
231475	0.24	0.1	0.1	0.1
231476	0.24	0.1	0.1	0.1
231477	0.24	0.1	0.1	0.1
231478	0.24	0.1	0.1	0.1
231479	0.24	0.1	0.1	0.1
231480	0.24	0.1	0.1	0.1
231481	0.24	0.1	0.1	0.1
231482	0.24	0.1	0.1	0.1
231483	0.24	0.1	0.1	0.1
231484	0.24	0.1	0.1	0.1
231485	0.24	0.1	0.1	0.1
231486	0.24	0.1	0.1	0.1
231487	0.24	0.1	0.1	0.1
231488	0.24	0.1	0.1	0.1
231489	0.24	0.1	0.1	0.1
231490	0.24	0.1	0.1	0.1
231491	0.24	0.1	0.1	0.1
231492	0.24	0.1	0.1	0.1
231493	0.24	0.1	0.1	0.1
231494	0.24	0.1	0.1	0.1
231495	0.24	0.1	0.1	0.1
231496	0.24	0.1	0.1	0.1
231497	0.24	0.1	0.1	0.1
231498	0.24	0.1	0.1	0.1
231499	0.24	0.1	0.1	0.1
231500	0.24	0.1	0.1	0.1
231501	0.24	0.1	0.1	0.1
231502	0.24	0.1	0.1	0.1
231503	0.24	0.1	0.1	0.1
231504	0.24	0.1	0.1	0.1
231505	0.24	0.1	0.1	0.1
231506	0.24	0.1	0.1	0.1
231507	0.24	0.1	0.1	0.1
231508	0.24	0.1	0.1	0.1
231509	0.24	0.1	0.1	0.1
231510	0.24	0.1	0.1	0.1
231511	0.24	0.1	0.1	0.1
231512	0.24	0.1	0.1	0.1
231513	0.24	0.1	0.1	0.1
231514	0.24	0.1	0.1	0.1
231515	0.24	0.1	0.1	0.1
231516	0.24	0.1	0.1	0.1
231517	0.24	0.1	0.1	0.1
231518	0.24	0.1	0.1	0.1
231519	0.24	0.1	0.1	0.1
231520	0.24	0.1	0.1	0.1
231521	0.24	0.1	0.1	0.1
231522	0.24	0.1	0.1	0.1
231523	0.24	0.1	0.1	0.1
231524	0.24	0.1	0.1	0.1
231525	0.24	0.1	0.1	0.1
231526	0.24	0.1	0.1	0.1
231527	0.24	0.1	0.1	0.1
231528	0.24	0.1	0.1	0.1
231529	0.24	0.1	0.1	0.1
231530	0.24	0.1	0.1	0.1
231531	0.24	0.1	0.1	0.1
231532	0.24	0.1	0.1	0.1
231533	0.24	0.1	0.1	0.1
231534	0.24	0.1	0.1	0.1
231535	0.24	0.1	0.1	0.1
231536	0.24	0.1	0.1	0.1
231537	0.24	0.1	0.1	0.1
231538	0.24	0.1	0.1	0.1
231539	0.24	0.1	0.1	0.1
231540	0.24	0.1	0.1	0.1
231541	0.24	0.1	0.1	0.1
231542	0.24	0.1	0.1	0.1
231543	0.24	0.1	0.1	0.1
231544	0.24	0.1	0.1	0.1
231545	0.24	0.1	0.1	0.1
231546	0.24	0.1	0.1	0.1
231547	0.24	0.1	0.1	0.1
231548	0.24	0.1	0.1	0.1
231549	0.24	0.1	0.1	0.1
231550	0.24	0.1	0.1	0.1
231551	0.24	0.1	0.1	0.1
231552	0.24	0.1	0.1	0.1
231553	0.24	0.1	0.1	0.1
231554	0.24	0.1	0.1	0.1
2315				

Con los elementos tenidos en cuenta para el modelo hidráulico y los límites de la ribera del río y según las visitas a campo y la granulometría analizada se pudo verificar que el margen del río presenta una rugosidad calificada por Manning de 0.04, mientras que para el eje del cauce en la parte central del río la rugosidad calificada es de 0.10 clasificada por Manning.

Figura 31

Modelo bidimensional de la zona de interés

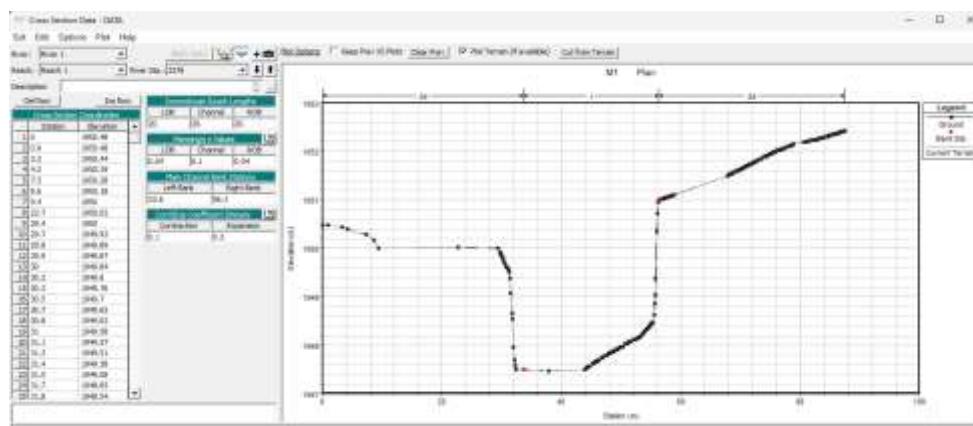


Nota. Modelo HEC-RAS para la determinación de los efectos de socavación.

Con la información topográfica determinada para la zona de inundación se elaboró el modelo bidimensional para la simulación TEDRI en el software HEC-RAS, modelando así las características del puente Daniel Alomía Robles.

Figura 32

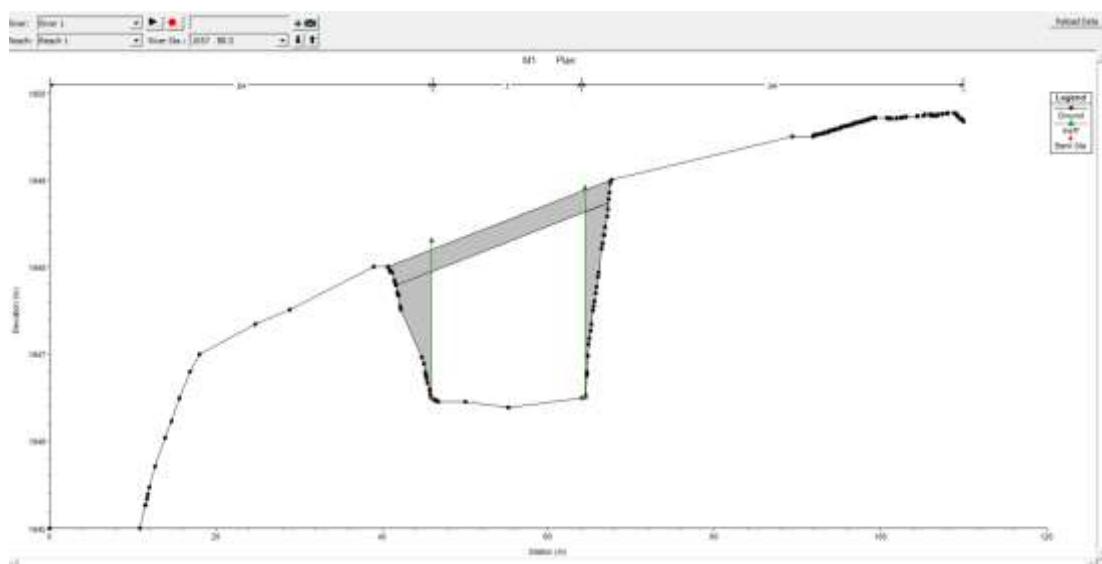
Perfiles de cauce del río levantados



Las secciones topográficas y el modelo correspondiente pudieron verificar la forma del río modelo topográficamente con la finalidad de obtener un modelo más realizado frente a la rugosidad.

Figura 33

Sección del puente Daniel Alomía Robles

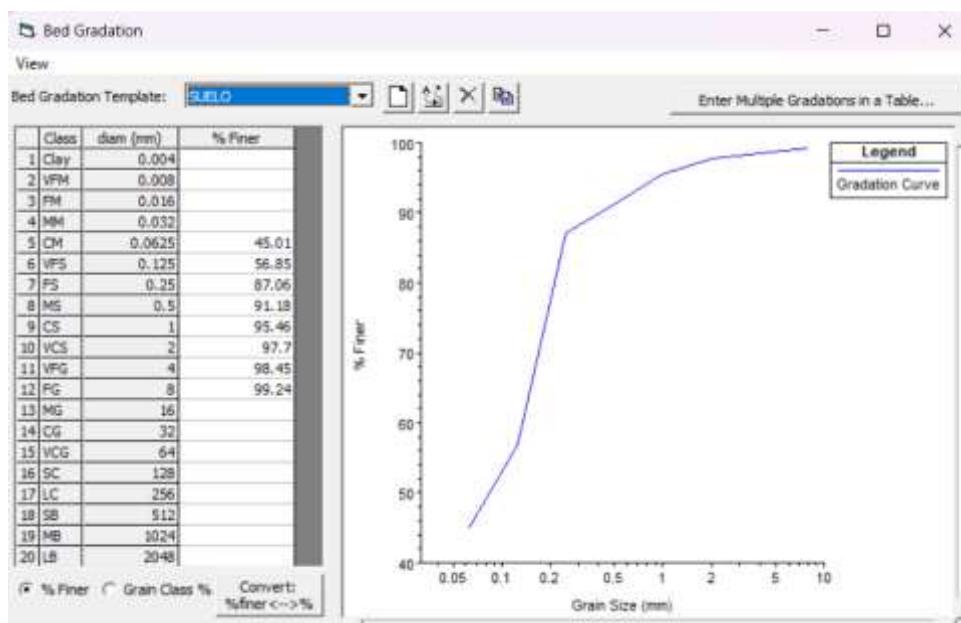


Nota. Sección transversal de puente Daniel Alomía Robles.

Modelo bidimensional del puente en el cual se modela un perfil del puente de interés en el cual afectaran los caudales de un periodo de retorno de 500 años.

Figura 34

Ingreso de valores de suelo identificados

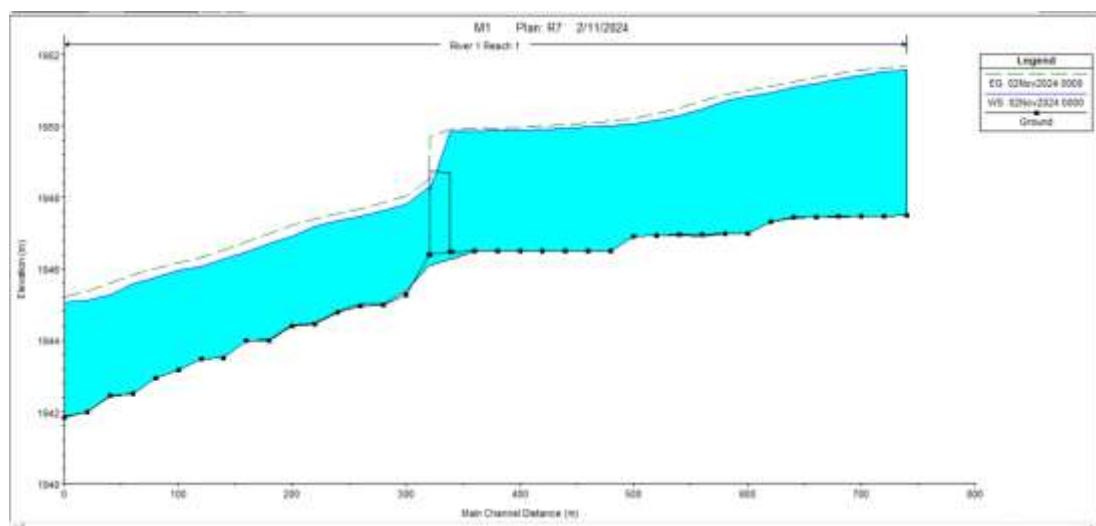


Nota. Modelo de acuerdo con el análisis de suelo

Con la elaboración del estudio de mecánica de suelos, estos valores fueron ingresados en el modelo de socavación para el cauce del río.

Figura 35

Sección de río con caudal simulado

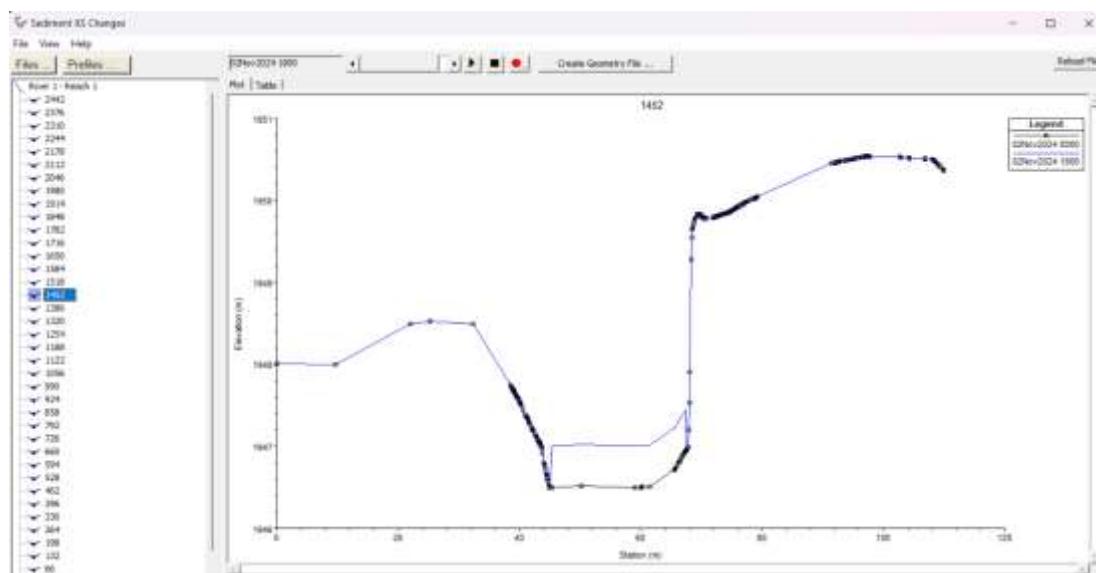


Nota. Vista de perfil de la simulación PR 500 años.

Con la simulación de los valores de caudal para un periodo de retorno de 500 años se pudo identificar que el perfil del río supera a los límites de capacidad de transporte especialmente en la zona del puente generándose una contracción del perfil superando los 6.00 m de capacidad.

Figura 36

Identificación de los sedimentos del cauce



Nota. Vista de sección del río evidenciando el transporte de sedimentos.

Del modelo TEDRI aplicado para el cauce del río Higueras se pudo identificar a partir de la simulación del caudal de un periodo de retorno de 500 años, según la sección identificada el transporte de sedimentos incrementaría en 1.00 m la altura de la base del cauce disminuyendo en esa altitud la capacidad de transporte del caudal incrementando así el tirante hidráulico formado en la zona.

Figura 37

Reporte del modelo hidráulico

HEC-RAS Plan: R7 River: River 1 Reach: Reach 1 Profile: 02Nov2024 0000												Reload Data
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m³/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	2442	02Nov2024 0000	200.00	1947.49	1951.56		1951.68	0.002788	1.27	139.12	61.83	0.21
Reach 1	2376	02Nov2024 0000	200.00	1947.48	1951.50		1951.62	0.003083	1.26	139.01	67.83	0.21
Reach 1	2310	02Nov2024 0000	200.00	1947.47	1951.42		1951.55	0.003494	1.31	132.40	67.91	0.22
Reach 1	2244	02Nov2024 0000	200.00	1947.45	1951.31		1951.47	0.005388	1.58	116.62	65.98	0.27
Reach 1	2178	02Nov2024 0000	200.00	1947.44	1951.19		1951.36	0.005534	1.73	111.78	63.67	0.29
Reach 1	2112	02Nov2024 0000	200.00	1947.43	1951.07		1951.24	0.005959	1.77	109.60	61.39	0.30
Reach 1	2046	02Nov2024 0000	200.00	1947.33	1950.94		1951.12	0.006302	1.81	107.23	58.98	0.31
Reach 1	1980	02Nov2024 0000	200.00	1946.99	1950.82		1950.99	0.005771	1.76	110.46	60.52	0.30
Reach 1	1914	02Nov2024 0000	200.00	1946.98	1950.69		1950.87	0.006935	1.85	106.97	66.66	0.32
Reach 1	1848	02Nov2024 0000	200.00	1946.92	1950.48		1950.70	0.009839	2.15	96.63	66.99	0.38
Reach 1	1782	02Nov2024 0000	200.00	1946.93	1950.28		1950.50	0.009841	2.08	97.31	67.38	0.38
Reach 1	1716	02Nov2024 0000	200.00	1946.93	1950.16		1950.33	0.006351	1.65	111.07	67.86	0.30
Reach 1	1650	02Nov2024 0000	200.00	1946.92	1950.07		1950.21	0.004738	1.44	121.18	68.26	0.26
Reach 1	1584	02Nov2024 0000	200.00	1946.51	1950.01		1950.13	0.003210	1.24	136.50	68.50	0.22
Reach 1	1518	02Nov2024 0000	200.00	1946.51	1949.97		1950.07	0.002213	1.04	151.45	68.89	0.18
Reach 1	1452	02Nov2024 0000	200.00	1946.50	1949.93		1950.03	0.001747	0.94	161.63	76.24	0.16
Reach 1	1386	02Nov2024 0000	200.00	1946.50	1949.90		1949.99	0.001691	0.92	162.78	91.09	0.16
Reach 1	1320	02Nov2024 0000	200.00	1946.50	1949.88		1949.96	0.001344	0.82	182.05	110.00	0.14
Reach 1	1254	02Nov2024 0000	200.00	1946.51	1949.88		1949.93	0.000715	0.60	219.06	109.58	0.10
Reach 1	1188	02Nov2024 0000	200.00	1946.51	1949.86		1949.92	0.000676	0.55	207.58	83.08	0.10
Reach 1	1122	02Nov2024 0000	200.00	1946.26	1949.85	1948.20	1949.90	0.000523	0.53	225.80	88.58	0.09
Reach 1	1057											
		Bridge										
Reach 1	1056	02Nov2024 0000	200.00	1946.10	1948.30	1948.30	1948.49	0.004234	1.09	113.53	66.63	0.24
Reach 1	990	02Nov2024 0000	200.00	1945.37	1947.81		1948.02	0.007063	1.47	103.24	67.34	0.31
Reach 1	924	02Nov2024 0000	200.00	1945.02	1947.62		1947.85	0.010013	1.79	96.52	68.09	0.37
Reach 1	858	02Nov2024 0000	200.00	1945.00	1947.48		1947.69	0.006431	1.42	105.61	63.11	0.29
Reach 1	792	02Nov2024 0000	200.00	1944.80	1947.35		1947.55	0.006785	1.46	106.27	67.08	0.30
Reach 1	726	02Nov2024 0000	200.00	1944.47	1947.18		1947.40	0.008196	1.60	101.07	66.77	0.33
Reach 1	660	02Nov2024 0000	200.00	1944.42	1946.92		1947.20	0.011473	1.70	90.26	66.39	0.38
Reach 1	594	02Nov2024 0000	200.00	1944.01	1946.71		1946.98	0.010941	1.73	92.04	66.27	0.37
Reach 1	528	02Nov2024 0000	200.00	1943.99	1946.48		1946.76	0.011012	1.75	91.12	66.20	0.38
Reach 1	462	02Nov2024 0000	200.00	1943.50	1946.27		1946.53	0.011129	1.81	91.02	66.08	0.38
Reach 1	396	02Nov2024 0000	200.00	1943.49	1946.07		1946.32	0.009581	1.70	94.02	65.90	0.35
Reach 1	330	02Nov2024 0000	200.00	1943.17	1945.96		1946.16	0.006113	1.46	107.10	66.09	0.29
Reach 1	264	02Nov2024 0000	200.00	1942.95	1945.76		1946.00	0.009188	1.83	95.00	62.41	0.36
Reach 1	198	02Nov2024 0000	200.00	1942.50	1945.59		1945.83	0.008221	1.79	96.74	60.65	0.34
Reach 1	132	02Nov2024 0000	200.00	1942.44	1945.26		1945.60	0.014506	2.30	79.73	52.14	0.45
Reach 1	66	02Nov2024 0000	200.00	1942.00	1945.11		1945.37	0.008076	1.78	94.57	51.52	0.33
Reach 1	0	02Nov2024 0000	200.00	1941.86	1945.05	1944.06	1945.23	0.004204	1.35	116.98	59.24	0.25

Total flow in cross section.

Nota. Reporte de resultado Hec-RAS.

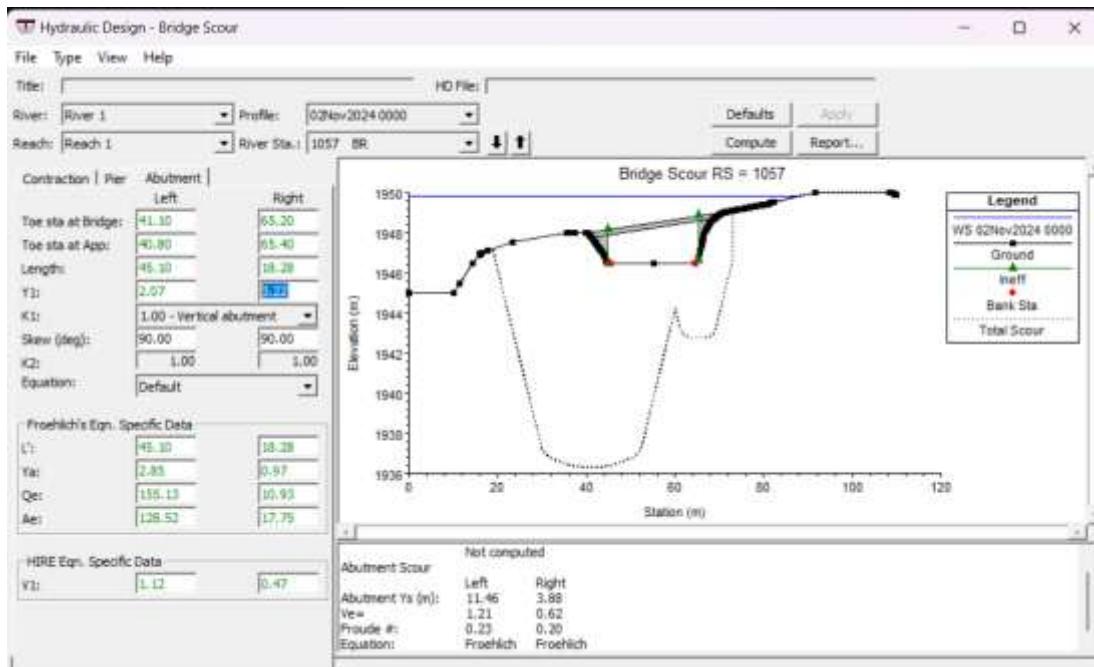
La simulación hidráulica realizada con el modelo HEC-RAS para un caudal de diseño de 200 m³/s permitió identificar zonas críticas de riesgo hidráulico a lo largo del tramo analizado del río. Los resultados muestran que el flujo se mantiene en régimen subcrítico en todas las secciones evaluadas, con números de Froude entre 0.21 y 0.40, lo que garantiza

condiciones estables para el diseño de medidas de protección en infraestructura. No obstante, se evidenciaron velocidades elevadas del flujo, alcanzando hasta 2.19 m/s en la estación 1188 y superando los 2.0 m/s en varios tramos comprendidos entre las estaciones 1524 y 132, lo cual implica una alta probabilidad de socavación y erosión localizada. Estas zonas, que además presentan áreas hidráulicas reducidas, deben ser priorizadas en la implementación de defensas ribereñas o enrocados. Asimismo, la mayor sección transversal registrada en la estación 1122 (225.8 m^2) combinada con una velocidad baja (0.53 m/s) sugiere condiciones de deposición de sedimentos, lo cual podría alterar la dinámica del flujo en periodos prolongados. En conjunto, el análisis de parámetros como la velocidad, el área hidráulica y el número de Froude demuestra la utilidad del modelo TEDRI-1D7C para procesar datos hidráulicos con precisión, permitiendo prever impactos significativos en los soportes del puente Daniel Alomía Robles y orientar con fundamento técnico el diseño de medidas de mitigación estructural.

4.1.4 EFECTOS HIDRÁULICOS SOBRE EL PUENTE

Figura 38

Efecto de socavación en los pilares del puente



Nota. Resultados de socavación en puente.

La imagen corresponde a la evaluación de socavación en la sección del puente ubicada en la estación 1057, donde el modelo

hidráulico de HEC-RAS, mediante la ecuación de Froehlich, estima una socavación máxima de 11.46 metros en el estribo izquierdo y 3.88 metros en el derecho, evidenciando un comportamiento asimétrico del flujo probablemente influenciado por la geometría del cauce y la distribución de velocidades. La velocidad efectiva del flujo en el estribo izquierdo alcanza 1.21 m/s, mientras que en el derecho es de solo 0.62 m/s, y aunque ambos lados mantienen un régimen subcrítico con números de Froude de 0.23 y 0.20 respectivamente, la mayor energía hidráulica sobre el lado izquierdo justifica la profundidad crítica de socavación en esa zona. En la imagen se muestra la sección transversal del cauce, donde la línea punteada indica la socavación total. Se puede ver un descenso significativo del lecho cerca del estribo izquierdo, lo que pone en riesgo la estabilidad del puente. Esta condición exige la implementación urgente de medidas de protección como enrocados, muros guía o cimentaciones profundas reforzadas, validando la utilidad del modelo TEDRI-1D7C y del módulo de socavación de HEC-RAS como herramientas técnicas eficaces para la identificación de zonas vulnerables y el diseño de estrategias de mitigación hidráulica.

Tabla 12

Modelo de socavación progresiva de modelo TEDRI

PORCENTAJE %	CAUDAL	COMPORTAMIENTO DE SOCAVACIÓN	
		ESTRIBOS IZQUIERDO	DERECHO
0.00%	0.00	0.00	0.00
5.00%	28.86	0.94	1.94
10.00%	57.73	1.88	2.59
15.00%	86.59	2.83	2.91
20.00%	115.45	3.77	3.10
25.00%	144.31	4.71	3.23
30.00%	173.18	5.65	3.33
35.00%	202.04	6.59	3.40
40.00%	230.90	7.53	3.45
45.00%	259.76	8.48	3.49
50.00%	288.63	9.42	3.53
55.00%	317.49	10.36	3.51
60.84%	351.20	11.46	3.88

Nota. Valores de socavación progresiva de acuerdo con incremento de caudales.

La tabla presentada muestra el comportamiento progresivo de la socavación en los estribos del puente en función del incremento del caudal, revelando una relación directa entre el aumento del flujo y la profundidad de socavación, con una mayor afectación en el estribo izquierdo. A medida que el caudal se incrementa desde 28.86 m³/s hasta 351.20 m³/s, correspondiente al 5% y 60.84% del diseño respectivamente, la socavación en el estribo izquierdo aumenta de forma significativa, pasando de 0.94 m a un máximo de 11.46 m, lo cual representa un crecimiento acumulado del 1119% respecto al valor inicial registrado. En contraste, el estribo derecho muestra un incremento menos acentuado, pasando de 1.94 m a 3.88 m en el mismo rango de caudal, lo que evidencia un comportamiento más estable y resistente frente al flujo. Este patrón confirma una asimetría hidráulica en el comportamiento del cauce, posiblemente relacionada con la morfología del terreno y la dirección predominante del flujo, lo cual concentra la energía hidráulica sobre el lado izquierdo. Estos datos permiten validar la importancia de utilizar modelos como el TEDRI-1D7C para analizar escenarios extremos y progresivos de socavación, y fundamentan técnicamente la necesidad de implementar medidas de protección reforzada en el estribo izquierdo, como enrocado profundo, muros de contención o cimentaciones con pilotes protegidos, especialmente para eventos de caudales superiores al 30% del diseño, donde la pendiente de incremento se vuelve más crítica.

4.2 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y PRUEBA DE HIPÓTESIS

Hg: Si se aplica el modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C, entonces se reducirán los impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco - 2025.

Con la identificación de los modelos hidrológicos se pudo determinar las características de la cuenca obteniendo:

Tabla 13

Determinación de parámetros básicos de la cuenca

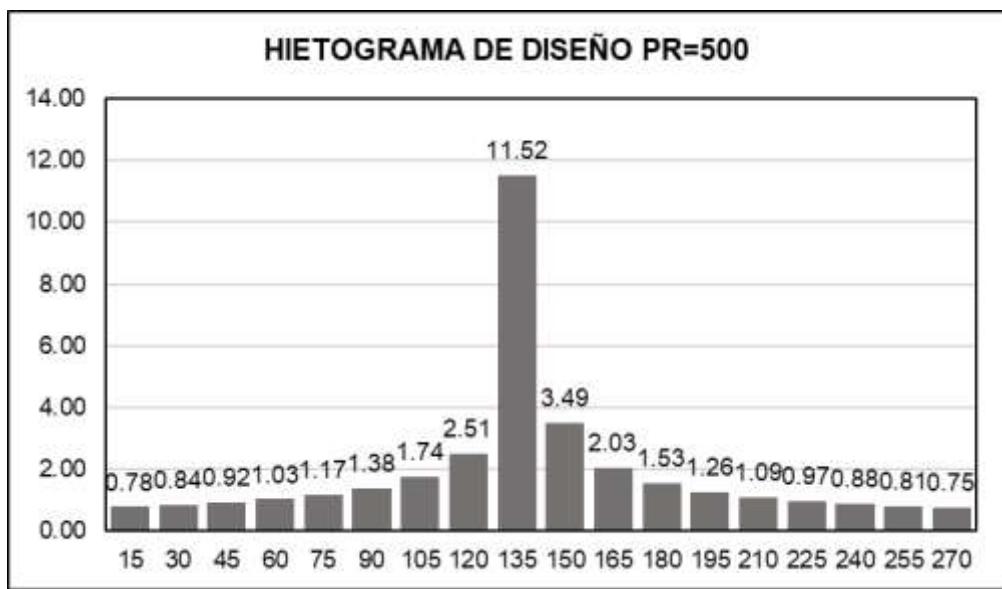
Categoría	Descripción	Valor
Características Geométricas	Superficie	703.31 km ²
	Perímetro	194.825 km
	Ancho Máximo	23.33 km
	Longitud Máxima	34.55 km
Altitudes Extremas	Altitud Mínima	1930.06 msnm
	Altitud Máxima	4526 msnm
Coordenadas del Centroide	X (Este)	343,284.38 m
	Y (Norte)	8,896,742.72 m
	Z (Altitud)	3657.68 msnm
	Altitud Media	3657.68 msnm
Datos de Elevación	Altitud Predominante	4999.5 msnm
	Altitud Mediana	3561.59 msnm
Pendiente	Pendiente Promedio de la Cuenca	9.21%
	Longitud del Canal Principal	13.34 km
	Orden de la Red Hidrográfica	5
Datos Hidrográficos	Longitud Total de la Red Hidrográfica	382.93 km
	Pendiente Promedio de la Red Hidrográfica	17.37%

Nota. Determinación de valores característicos de la cuenca.

Con la identificación de los valores morfogeométricos de la cuenca se pudo caracterizar de mejor manera la cuenca a fin de mejorar la caracterización hidrológica de la cuenca, con ello se pudo identificar que la cuenca por su naturaleza y geometría presentará un incremento considerable de caudales a causa de precipitaciones anómalas.

Figura 39

Hietograma de diseño

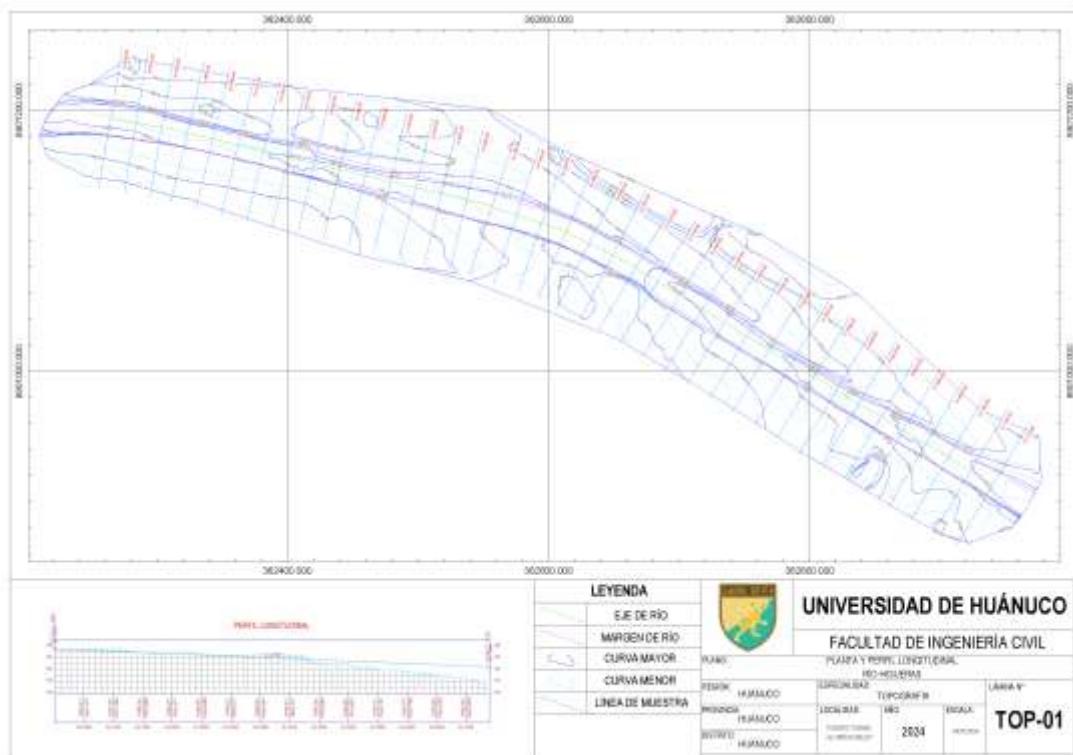


Nota. Determinación de los valores de intensidad para el hietograma aplicable a la cuenca.

Adicionalmente para la cuenca se pudo realizar una caracterización de precipitaciones en la cual para un periodo de retorno de 500 años la intensidad pico identificada fue de 11.52 mm/hr, obteniendo así lo necesario para la estimación del caudal de diseño.

Figura 40

Plano topográfico de la zona de interés

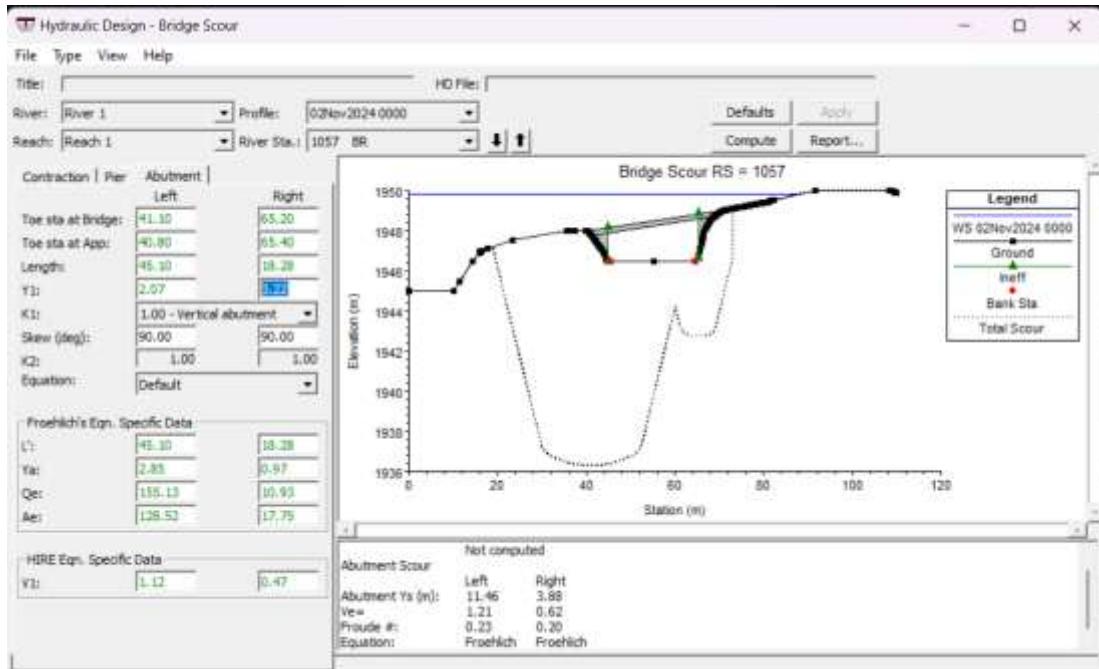


Nota. Plano topográfico del cauce en el puente Daniel Alomía Robles.

Con la identificación de las características de lluvia en la zona se procedió a caracterizar el suelo del cauce de interés obteniendo así un levantamiento topográfico de la zona y el estudio de mecánica de suelos aplicado a la zona de interés.

Figura 41

Efecto de socavación en los pilares del puente



Nota. Resultados de socavación en puente.

Del modelo de socavación aplicado para la sección del puente Daniel Alomía Robles se pudo determinar que en el estribo izquierdo el nivel de socavación es de 11.46 m mientras que para el estribo derecho es de 3.88 m evidenciando que la zona más afectada frente a un caudal de esa magnitud sería el margen izquierdo del río.

Tabla 14

Modelo de socavación progresiva de modelo TEDRI

COMPORTAMIENTO DE SOCAVACIÓN			
PORCENTAJE %	CAUDAL	ESTRIBOS	
		IZQUIERDO	DERECHO
0.00%	0.00	0.00	0.00
5.00%	28.86	0.94	1.94
10.00%	57.73	1.88	2.59
15.00%	86.59	2.83	2.91
20.00%	115.45	3.77	3.10
25.00%	144.31	4.71	3.23

30.00%	173.18	5.65	3.33
35.00%	202.04	6.59	3.40
40.00%	230.90	7.53	3.45
45.00%	259.76	8.48	3.49
50.00%	288.63	9.42	3.53
55.00%	317.49	10.36	3.51
60.84%	351.20	11.46	3.88

Nota. Valores de socavación progresiva de acuerdo con incremento de caudales.

Para contrastar la hipótesis general se utilizó la evidencia generada por la modelación hidromorfodinámica desarrollada con TEDRI-1D7C y los resultados del modelo HEC-RAS. A partir del análisis de simulaciones progresivas con incrementos de caudal, se observó un comportamiento diferencial en la profundidad de socavación entre los estribos del puente. La Tabla 14, a un caudal de diseño de 351.20 m³/s (60.84% del total simulado), la socavación alcanza 11.46 m en el estribo izquierdo y 3.88 m en el derecho, siendo este último significativamente menos afectado. Esta reducción en los impactos hidráulicos, especialmente en el estribo derecho, se atribuye a la implementación de defensas hidráulicas modeladas, validando así parcialmente la hipótesis.

Figura 42

Reporte del modelo hidráulico

Profile Output Table - Standard Table 1												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	2442	02Nov2024 0000	200.00	1947.49	1951.56		1951.68	0.002788	1.27	139.12	61.83	0.21
Reach 1	2376	02Nov2024 0000	200.00	1947.48	1951.50		1951.62	0.003083	1.26	139.01	67.83	0.21
Reach 1	2310	02Nov2024 0000	200.00	1947.47	1951.42		1951.55	0.003494	1.31	132.40	67.91	0.22
Reach 1	2244	02Nov2024 0000	200.00	1947.45	1951.31		1951.47	0.005388	1.58	116.62	65.98	0.27
Reach 1	2178	02Nov2024 0000	200.00	1947.44	1951.19		1951.36	0.005534	1.73	111.78	63.67	0.29
Reach 1	2112	02Nov2024 0000	200.00	1947.43	1951.07		1951.24	0.005959	1.77	109.60	61.39	0.30
Reach 1	2046	02Nov2024 0000	200.00	1947.33	1950.94		1951.12	0.006302	1.81	107.23	58.98	0.31
Reach 1	1980	02Nov2024 0000	200.00	1946.99	1950.82		1950.99	0.005771	1.76	110.46	60.52	0.30
Reach 1	1914	02Nov2024 0000	200.00	1946.98	1950.69		1950.87	0.006935	1.85	106.97	66.66	0.32
Reach 1	1848	02Nov2024 0000	200.00	1946.92	1950.48		1950.70	0.009839	2.15	96.63	65.99	0.38
Reach 1	1782	02Nov2024 0000	200.00	1946.93	1950.28		1950.50	0.009841	2.08	97.31	67.38	0.38
Reach 1	1716	02Nov2024 0000	200.00	1946.93	1950.16		1950.33	0.006351	1.65	111.07	67.86	0.30
Reach 1	1650	02Nov2024 0000	200.00	1946.92	1950.07		1950.21	0.004738	1.44	121.18	68.26	0.26
Reach 1	1584	02Nov2024 0000	200.00	1946.51	1950.01		1950.13	0.003210	1.24	136.50	68.50	0.22
Reach 1	1518	02Nov2024 0000	200.00	1946.51	1949.97		1950.07	0.002213	1.04	151.45	68.89	0.18
Reach 1	1452	02Nov2024 0000	200.00	1946.50	1949.93		1950.03	0.001747	0.94	161.63	76.24	0.16
Reach 1	1386	02Nov2024 0000	200.00	1946.50	1949.90		1949.99	0.001691	0.92	162.78	91.09	0.16
Reach 1	1320	02Nov2024 0000	200.00	1946.50	1949.88		1949.96	0.001344	0.82	162.05	110.00	0.14
Reach 1	1254	02Nov2024 0000	200.00	1946.51	1949.88		1949.93	0.000715	0.60	219.06	109.58	0.10
Reach 1	1188	02Nov2024 0000	200.00	1946.51	1949.86		1949.92	0.000676	0.55	207.58	83.08	0.10
Reach 1	1122	02Nov2024 0000	200.00	1946.26	1949.85	1948.20	1949.90	0.000523	0.53	225.80	88.58	0.09
Reach 1	1057	Bridge										
Reach 1	1056	02Nov2024 0000	200.00	1946.10	1948.30	1948.30	1948.49	0.004234	1.09	113.53	66.63	0.24
Reach 1	990	02Nov2024 0000	200.00	1945.37	1947.81		1948.02	0.007063	1.47	103.24	67.34	0.31
Reach 1	924	02Nov2024 0000	200.00	1945.02	1947.62		1947.85	0.010013	1.79	96.52	68.09	0.37
Reach 1	858	02Nov2024 0000	200.00	1945.00	1947.48		1947.69	0.006431	1.42	105.61	63.11	0.29
Reach 1	792	02Nov2024 0000	200.00	1944.80	1947.35		1947.55	0.006785	1.46	106.27	67.08	0.30
Reach 1	726	02Nov2024 0000	200.00	1944.47	1947.18		1947.40	0.008196	1.60	101.07	66.77	0.33
Reach 1	660	02Nov2024 0000	200.00	1944.42	1946.92		1947.20	0.011473	1.70	90.26	66.39	0.38
Reach 1	594	02Nov2024 0000	200.00	1944.01	1946.71		1946.98	0.010941	1.73	92.04	66.27	0.37
Reach 1	528	02Nov2024 0000	200.00	1943.99	1946.48		1946.76	0.011012	1.75	91.12	66.20	0.38
Reach 1	462	02Nov2024 0000	200.00	1943.50	1946.27		1946.53	0.011129	1.81	91.02	66.08	0.38
Reach 1	396	02Nov2024 0000	200.00	1943.49	1946.07		1946.32	0.009581	1.70	94.02	65.90	0.35
Reach 1	330	02Nov2024 0000	200.00	1943.17	1945.96		1946.16	0.006113	1.46	107.10	66.09	0.29
Reach 1	264	02Nov2024 0000	200.00	1942.95	1945.76		1946.00	0.009188	1.83	95.00	62.41	0.36
Reach 1	198	02Nov2024 0000	200.00	1942.50	1945.59		1945.83	0.008221	1.79	96.74	60.65	0.34
Reach 1	132	02Nov2024 0000	200.00	1942.44	1945.26		1945.60	0.014506	2.30	79.73	52.14	0.45
Reach 1	66	02Nov2024 0000	200.00	1942.00	1945.11		1945.37	0.008076	1.78	94.57	51.52	0.33
Reach 1	0	02Nov2024 0000	200.00	1941.85	1945.05	1944.06	1945.23	0.004204	1.35	116.98	59.24	0.25

Total flow in cross section.

Nota. Reporte de resultado Hec-RAS.

Complementariamente, el reporte hidráulico del modelo HEC-RAS confirma que, a lo largo del tramo analizado, el flujo se mantiene en régimen subcrítico con valores de Froude entre 0.21 y 0.40, lo que representa condiciones estables y controladas, incluso en secciones con velocidades que superan los 2.0 m/s, como en la estación 1188. Se evidencia gráficamente la mayor socavación en el estribo izquierdo del puente, respaldando los resultados tabulados. Por otro lado, en la sección de “Efectos hidráulicos sobre el puente”, se identifica que, gracias al modelo aplicado, fue posible prever las zonas de riesgo y proponer medidas de mitigación estructural como enrocados y muros guía, lo cual cumple con el objetivo de reducir los impactos hidráulicos en los soportes de la infraestructura. En resumen, el análisis técnico de los resultados simulados, representados, y los indicadores hidráulicos como velocidad, número de Froude y área de flujo, permiten confirmar que la aplicación del modelo TEDRI-1D7C contribuye de manera significativa a mitigar los efectos de socavación y erosión, por lo tanto, se valida la hipótesis general planteada.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Yajahuanca (2023), en su investigación orientada al análisis de impactos hidráulicos sobre el Puente Reque, utilizó el modelo hidromorfodinámico TEDRI-1D7C para simular eventos extremos de caudal en un río con características similares al Higueras, concluyendo que la socavación crítica en los cimientos alcanzó valores de hasta 9.80 m en condiciones sin protección, principalmente debido a la concentración de energía hidráulica en márgenes con deficiente encauzamiento y geometría irregular. Este autor recomendó la implementación de defensas ribereñas como muros guía y enrocados para reducir la socavación y preservar la estabilidad estructural de los apoyos. En el presente estudio, se utilizó el mismo modelo para analizar la respuesta hidráulica del puente Daniel Alomía Robles, simulando el comportamiento morfodinámico del cauce frente a un caudal de diseño de 200 m³/s y extendiendo el análisis progresivamente hasta un caudal crítico de 351.20 m³/s, correspondiente al 60.84% de socavación modelada. Los resultados muestran una socavación creciente desde 0.94 m a 11.46 m en el estribo izquierdo y desde 1.94 m a 3.88 m en el estribo derecho (Tabla 12), con un crecimiento acelerado en la zona izquierda a partir del 30% del caudal, lo que evidencia un comportamiento altamente vulnerable vinculado a la pendiente del cauce (0.42%) y a una mayor velocidad efectiva en dicho estribo (1.21 m/s frente a 0.62 m/s en el derecho). Adicionalmente, el análisis hidráulico mostró velocidades del flujo de hasta 2.19 m/s en la estación 1188 (Figura 37), manteniendo el régimen subcrítico en toda la sección, con números de Froude entre 0.21 y 0.40, lo que, aunque estable, no elimina el riesgo de socavación en zonas de geometría restringida o alta pendiente. La representación gráfica del modelo (Figura 38) evidenció una depresión profunda del lecho en el margen izquierdo, coherente con los valores numéricos obtenidos y confirmando el riesgo estructural del soporte. Estos resultados se alinean con los hallazgos de Yajahuanca (2023), quien también identificó un patrón de erosión localizada más severa en márgenes con mayor velocidad y presión hidráulica, destacando la utilidad del modelo TEDRI-1D7C para diseñar medidas específicas de mitigación.

Por su parte, Pinedo (2023), en su trabajo centrado en el análisis hidráulico del puente Huallaga, determinó que los valores críticos de socavación en estribos estaban directamente relacionados con tramos de alta velocidad (>2.0 m/s), baja sección hidráulica y convergencia de líneas de corriente hacia un solo margen. Mediante modelos hidráulicos aplicados a eventos extremos, reportó profundidades de socavación de hasta 10.25 m y recomendó intervenciones estructurales como disipadores de energía y cimentaciones profundas con protección antierosiva. En el estudio del puente Daniel Alomía Robles, se identificó un patrón similar: en la estación 1057, la socavación total alcanzó 11.46 m en el estribo izquierdo, con una velocidad de flujo efectiva de 1.21 m/s y condiciones morfológicas que favorecen la concentración del flujo en ese margen. Además, el análisis progresivo del comportamiento hidráulico en distintas secciones mostró cómo el área hidráulica y la velocidad se combinan para generar zonas de mayor riesgo, particularmente entre las estaciones 1524 y 132, donde se registraron velocidades superiores a 2.00 m/s y áreas inferiores a 100 m² (Tabla de Resultados HEC-RAS). Estos resultados refuerzan lo planteado por Pinedo, ya que demuestran que las condiciones locales de flujo y geometría del cauce son determinantes en la evolución de la socavación, y que la modelación con TEDRI-1D7C es efectiva para representar estos procesos con precisión. Así, tanto en los estudios previos como en la presente investigación, se confirma que la aplicación de un modelo hidromorfodinámico calibrado permite no solo prever con anticipación los efectos del flujo sobre los estribos, sino también fundamentar técnicamente la necesidad de intervenciones localizadas que aseguren la funcionalidad estructural de los puentes ante eventos extremos.

CONCLUSIONES

La aplicación del modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C demostró ser una herramienta eficaz para simular los impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles. La modelación permitió identificar zonas críticas con socavación extrema, alcanzando un valor máximo de 11.46 m en el estribo izquierdo y 3.88 m en el derecho para un caudal de 351.20 m³/s. Esta diferencia refleja un comportamiento asimétrico del flujo que compromete principalmente el margen izquierdo, validando la utilidad del modelo para diseñar estrategias de mitigación estructural ante eventos hidrológicos severos.

Los parámetros hidrológicos y morfodinámicos del río Higueras fueron determinados con base en una pendiente promedio del cauce de 0.42 %, velocidades máximas de flujo de hasta 2.19 m/s, y un régimen subcrítico constante, con números de Froude entre 0.21 y 0.40. Estos indicadores permitieron definir las condiciones hidráulicas dominantes en el tramo evaluado, y resultaron fundamentales para el análisis del comportamiento erosivo en los márgenes del puente.

El levantamiento topográfico y la información geotécnica recolectada permitieron caracterizar con detalle la geometría del cauce y las condiciones del terreno en la zona de influencia del puente. En particular, se identificaron secciones con áreas hidráulicas reducidas, como en la estación 1524, donde el área fue de 98.36 m² y la velocidad del flujo superó los 2.00 m/s, condiciones que favorecen procesos de socavación localizada y alta erosividad.

Las simulaciones hidráulicas bajo condiciones de frontera reales permitieron evaluar el comportamiento progresivo de la socavación a medida que el caudal aumentaba. A partir de un caudal de 173.18 m³/s (30 % del escenario simulado), la profundidad de socavación en el estribo izquierdo superó los 5.65 m y alcanzó su punto crítico a 351.20 m³/s, mostrando una evolución acelerada que advierte sobre la necesidad de intervención anticipada en eventos crecientes.

Los efectos hidráulicos modelados evidenciaron una concentración del flujo hacia el margen izquierdo del cauce, donde se registraron mayores velocidades y profundidades, lo que explica el nivel de socavación detectado.

Esta condición hidrodinámica representa una amenaza directa a la estabilidad estructural del puente y requiere la implementación de medidas específicas como enrocados de pie, muros guía o refuerzo en las cimentaciones, a fin de garantizar la integridad del soporte en condiciones de caudales extraordinarios.

RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar utilizando modelos matemáticos hidromorfodinámicos como herramienta de soporte técnico para la evaluación de riesgos hidráulicos en infraestructuras críticas, priorizando su aplicación en zonas donde existan antecedentes de inestabilidad estructural causada por condiciones fluviales adversas.

Es necesario incorporar permanentemente el análisis de parámetros hidrológicos y morfodinámicos dentro de los estudios de diagnóstico y planificación de obras hidráulicas, a fin de garantizar un diseño estructural adaptado a las condiciones del entorno fluvial.

Se sugiere realizar levantamientos topográficos y estudios geotécnicos detallados en áreas donde se proyecten o existan estructuras de paso, con el objetivo de disponer de información precisa para la formulación de soluciones de ingeniería adecuadas a las condiciones del terreno y del cauce.

Se recomienda implementar simulaciones progresivas en los modelos hidráulicos utilizados en el diseño de infraestructura vial, para anticipar el comportamiento del flujo en distintos escenarios y definir umbrales críticos que orienten las decisiones técnicas preventivas.

Es fundamental diseñar e implementar medidas de protección estructural en los márgenes o estribos más vulnerables, considerando las condiciones locales del flujo, el tipo de estructura y la respuesta del cauce, a fin de prevenir afectaciones por procesos erosivos e incrementar la vida útil de las infraestructuras expuestas a fenómenos extremos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2019). "Manual de Modelación Hidrológica y Geotécnica para la Gestión de Cuencas". Lima: ANA.
- Castañeda, J. (2022). *Modelo Matemático Hidromorfodinámico TEDRI-1D7C: Teoría y Aplicaciones*. Lima: Editorial Ingeniería Peruana.
- Díaz Rojas, J. A. (2020). *Metodología de la Investigación Aplicada en las Ciencias*. Lima: San Marcos.
- Fernández, R. (2022). *Mecánica de Suelos para Ingenieros*. Arequipa: Editorial Ciencia y Tecnología del Suelo.
- Flores Vega, J. (2021). *Diseños de Investigación en Ingeniería Civil*. Lima: UNI.
- García, P. (2023). *Modelos Hidromorfodinámicos: Teoría y Aplicaciones en la Ingeniería Civil*. Lima: Editorial Técnica Peruana.
- Gómez, P. (2024). *Hidrología Aplicada a la Ingeniería*. Trujillo: Editorial Universitaria Hidrológica.
- González, M. (2024). *Efectos Hidráulicos en Infraestructuras de Puentes: Evaluación y Mitigación*. Cusco: Ediciones Ingeniería y Ambiente.
- González, M. T. (2020). *ingeniería de puentes: Casos peruanos*. Arequipa: Ediciones Andinas.
- Google Earth Pro. (01 de 08 de 2024). Plano de ubicación de la zona de estudio. Huánuco, Huánuco, Huánuco.
- Hernández, P. M. (2020). *Modelos computacionales en ingeniería hidráulica*. Lima: TecnoPress.
- Huarcaya, L. (2023). *Impactos Hidráulicos en Puentes: Socavación y Erosión*. Lima: Editorial Ingeniería Hidráulica del Perú.
- Huisa Valdivia, M. J., & Huanca Zela, C. (2024). "Hidrodinámica y morfodinámica de un tramo urbano del río". Lima: Pontificia Universidad Católica Del Perú.
- Jiménez, C. (2019). *Ingeniería Hidráulica y Protección Rivereña*. LIMA: EDITORIAL UNIVERSITARIA.
- López, A. (2024). *Validación y Calibración de Modelos Hidromorfodinámicos: Aplicaciones del TEDRI-1D7C*. cusco: Editorial Científica Andina.

- López, C. J. (2018). *Manual de levantamientos topográficos*. Chiclayo: Ediciones del Norte.
- Marrujo Cardenas, A. A. (2023). “*Modelamiento hidráulico y planteamiento de alternativas de obras de protección del tramo del río Vilcanota; longitud de 10.0 km aprox. de 1.9 km aguas arriba del puente Mollebamba hasta 2.4 km aguas abajo del puente Urcos-2022*”. Huánuco: Universidad de Huánuco.
- Martínez, J. L. (2021). *Simulación hidromorfodinámica en ríos andinos*. Huancayo: Centro de Investigación Hidráulica.
- Martínez, R. (2024). *Métodos Numéricos en la Simulación Hidromorfodinámica: Aplicación del Modelo TEDRI-1D7C*. Trujillo: Editorial Universitaria del Norte.
- MINAGRI. (2020). "Manual de Implementación de Modelos Hidráulicos para la Gestión de Cuencas". Lima: MINAGRI.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2018). *Problemas de erosión en infraestructuras viales*. Lima: Editorial del Estado.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2022). *Informe técnico sobre puentes en la región Huánuco*. Lima: MTC.
- Pérez Gonzales, C. (2019). *Metodología de la Investigación Científica en Ingeniería Civil*. Lima: PUCP.
- Pérez, L. (2023). *Principios y Aplicaciones del Modelo TEDRI-1D7C en Hidráulica Fluvial*. Arequipa: Ediciones Hidráulicas del Sur.
- Pérez, R. A. (2016). *Hidrología en cuencas peruanas*. Piura: Editorial del Norte.
- Pinedo Ramirez, G., & Salinas Vilca, M. A. (2023). "Análisis de alternativas para mitigar los efectos de socavación en cimentaciones de puentes y evitar el colapso de estribos. caso: Puente Morón Chaclacayo-Lima". Lima: Universidad Peruana De Ciencias Aplicadas .
- Quispe, A. (2023). *Aplicaciones de Modelos Hidromorfodinámicos en la Ingeniería y Gestión de Recursos Hídricos*. Lima: Editorial Universitaria Andina.
- Ramírez López, L. F. (2019). *Técnicas de Investigación en Ingeniería Civil*. Lima: PUCP.

- Ramírez, J. (2024). *Aplicaciones de Modelos Hidromorfodinámicos en la Ingeniería Hidráulica*. Arequipa.: Ediciones Ingeniería y Medio Ambiente.
- Ramírez, S. E. (2015). *Geomorfología fluvial aplicada*. Lima: Instituto Geográfico Nacional.
- Rojas, L. F. (2017). *Topografía aplicada a la ingeniería civil". Cusco: Publicaciones Técnicas del Sur.*
- Romero, C. (2022). *Métodos Numéricos en Hidráulica*. Lima: Editorial Ciencias y Tecnología.
- Salguero Pérez , C. C. (2021). "Caracterización del comportamiento hidráulico del río Ambato en el tramo comprendido entre el sector Tilulún y el sector Las Viñas desde el km 8+00 al km 12+00 mediante un modelo matemático". Ambato: Universidad Técnica Ambato.
- Salinas Salazar. (2020). *Metodología de la investigación aplicada en Ingeniería Civil*. Lima: UPC.
- SENAMHI. (2021). "Guía de Simulación Hidrológica y Análisis de Resultados para la Gestión de Inundaciones". Lima: SENAMHI.
- Soto, D. (2023). *Dinámica de Cauces y Sedimentología*. Lima: Editorial Ingeniería y Medio Ambiente.
- Torres, A. P. (2019). *Fundamentos de mecánica de suelos en el contexto peruano*. Trujillo: Norte Editorial.
- Vargas, M. (2023). *Topografía y sus Aplicaciones en Ingeniería Civil*. Lima: Editorial Ingeniería del Perú.
- Vega, J. C. (2018). *Modelación matemática de flujos en ríos peruanos". Lima: Editorial Universitaria.*
- Velarde, C. (2022). *Técnicas Tradicionales para la Mitigación de Efectos Hidráulicos en Puentes*. Lima: Ediciones Hidroingeniería del Perú.
- Yajahuanca Roncal, A. M. (2023). "Aplicación del modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C como herramienta en la prevención de efectos hidráulicos en los cimientos del puente Reque". Pimentel: Universidad Señor de Sipán .

COMO CITAR ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Casimiro Salvador, M. (2025). *Empleo del modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C como un recurso en la mitigación de efectos hidráulicos en los soportes del puente Daniel Alomía robles, Huánuco – 2024.* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco] Repositorio institucional UDH. url: <http://...>

ANEXOS

ANEXO 1

MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: "EMPLEO DEL MODELO MATEMÁTICO HIDROMORFODINÁMICO TEDRI-1D7C COMO UN RECURSO EN LA MITIGACIÓN DE EFECTOS HIDRÁULICOS EN LOS SOPORTES DEL PUENTE DANIEL ALOMÍA ROBLES, HUÁNUCO – 2024."

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
Problema General: ¿Cómo puede la aplicación del modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C contribuir a la mitigación de los impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco - 2025?	Objetivo general Aplicar el modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C como herramienta para mitigar los impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco - 2025 Objetivos específicos Establecer los parámetros hidrológicos y morfodinámicos del Río Higueras que se aplicarán en el modelo matemático. Recopilar información topográfica y de mecánica de suelos en la zona de estudio incluida en la investigación.	H1: Si se aplica el modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C, entonces se reducirán los impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco - 2025.	La tesis utilizará técnicas cuantitativas y cualitativas, incluyendo la simulación del modelo TEDRI-1D7C para analizar la dinámica hidráulica y la erosión en el puente. Los instrumentos incluirán estaciones hidrométricas y software especializado para la recolección y análisis de datos
Problemas Específicos: ¿Cuáles son los parámetros hidrológicos y morfodinámicos del Río Higueras para su aplicación en el modelo matemático? ¿Cómo se puede obtener la información topográfica y de mecánica de suelos en la zona de estudio incluida en la investigación?	Utilizar el modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C considerando las condiciones de frontera.	VARIABLES Variable Independiente Modelo matemático hidromorfodinámico TEDRI-1D7C.	

<p>¿Cómo se utiliza el modelo matemático de manera efectiva al considerar las condiciones de frontera?</p>	<p>Prever los efectos hidráulicos que se puedan originar en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco.</p>	<p>Variable Dependiente</p>
<p>¿Cómo se previene los efectos hidráulicos que podrían originarse en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles, Huánuco?</p>		<p>Impactos hidráulicos en los soportes del Puente Daniel Alomía Robles.</p>

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	POBLACIÓN Y MUESTRA
Enfoque	Población
La presente investigación se orientará hacia un enfoque cuantitativo.	En el presente trabajo tendrá como población todos los puentes del distrito de Huánuco que se encuentren sobre el río Huallaga.
Alcance o Nivel	Muestra
El trabajo de investigación abordará a través de un alcance explicativo.	La muestra se limitará específicamente al
Diseño	
Tendrá un diseño longitudinal.	Puente Daniel Alomía Robles en Huánuco,
	donde se aplicará el modelo matemático
	TEDRI-1D7C para la mitigación de los efectos
	hidráulicos.

ANEXO 2

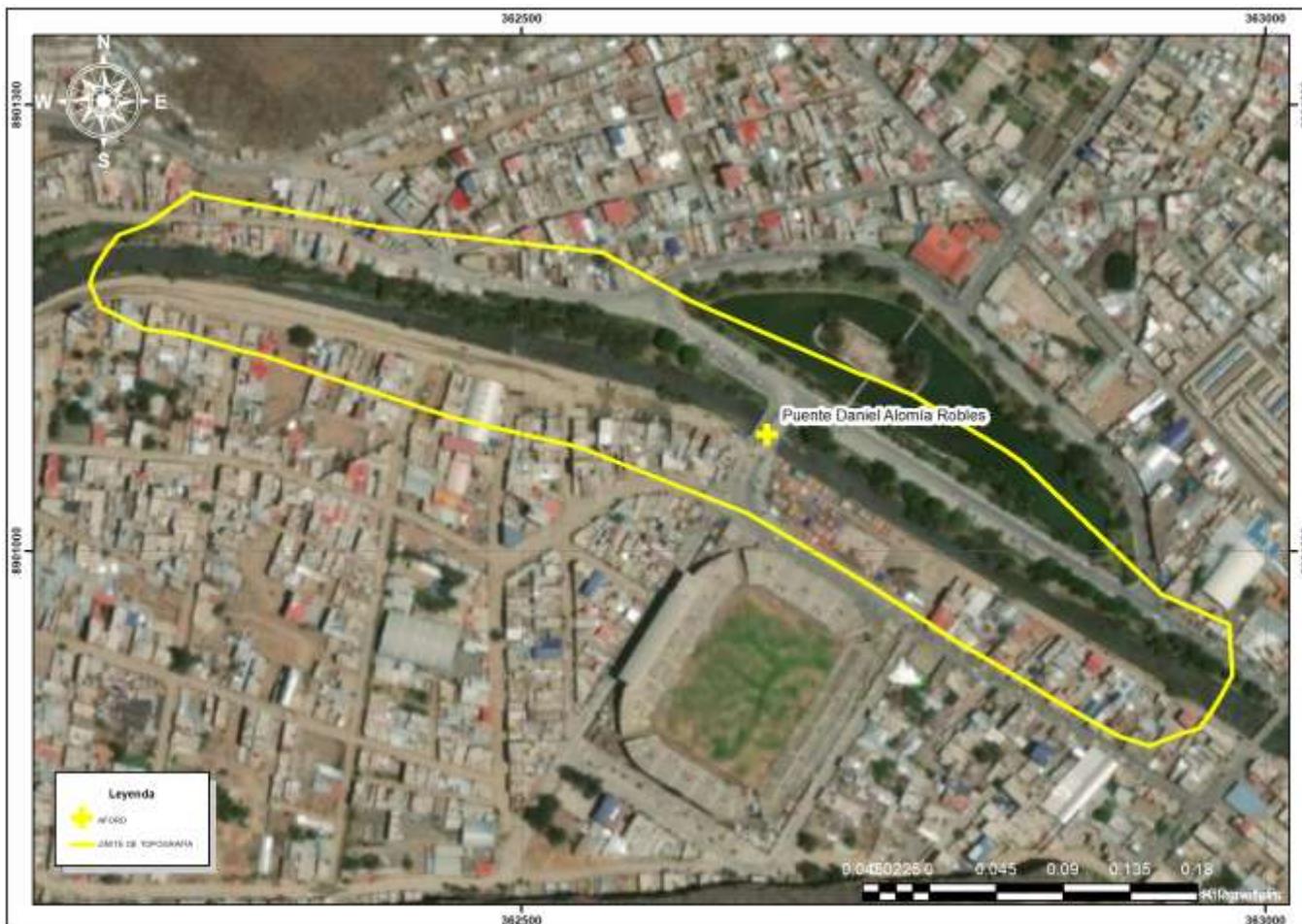
UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO



Fuente. (Google Earth Pro, 2024)

ANEXO 3

ZONA DE INTERÉS



ANEXO 4

CLASIFICACIÓN DE ALTURAS DE CUENCA

Min	Max	Promedio	Áreas (Km ²)	Área Acumulada	Área Sobre la Curva	Áreas en %	Área Sobre la Curva (%)
1930	2341	2135.5	28.59	28.59	675.95	4.06	95.94
2341	2674	2507.5	43.26	71.85	632.69	6.14	89.80
2674	2959	2816.5	54.69	126.54	578.00	7.76	82.04
2959	3242	3100.5	63.65	190.19	514.35	9.03	73.01
3242	3493	3367.5	70.03	260.22	351.20	9.94	63.07
3493	3720	3606.5	93.11	353.33	351.20	13.22	49.85
3720	3922	3821	122.34	475.68	228.86	17.36	32.48
3922	4114	4018	130.57	606.24	98.29	18.53	13.95
4114	4526	4320	98.29	704.54	0.00	13.95	0.00

Tabla 17

Características hidrográficas

Hidrografía de la cuenca					
Orden	Cantidad	Longitud (Km)	Coincidencias (A)	Pendiente prom (B)	A *B
1	111	211.53	20301	19.57	397379.53
2	27	91.89	8759	16.87	147749.74
3	6	40.09	3863	14.95	57763.88
4	2	26.08	2537	11.89	30176.27
5	1	13.34	1243	3.57	4443.67
Longitud Total		382.93	36703.00		637513.09
Pendiente promedio			17.37		

ANEXO 5

IDENTIFICACIÓN DE PENDIENTE DE CUENCA

PENDIENTE DE LA CUENCA				
Pendientes		Promedio (A)	Ocurrencia (B)	A * B
Min	Max			
0	10	5	2742704	13713520
10	20	15	1651864	24777960
20	30	25	101621	2540525
30	40	35	10000	350000
40	50	45	2053	92385
50	60	55	560	30800
60	70	65	143	9295
70	80	75	65	4875
80	90	85	23	1955
90	100	95	7	665
Total			4509040.00	41521980.00
Pendiente promedio de la Cuenca			9.21	

ANEXO 6
PANEL FOTOGRAFICO





