

**UNIVERSIDAD NACIONAL
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AGRÍCOLA**



**ESTIMACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN LOCAL
EN EL PUENTE JANGAS MEDIANTE ECUACIONES EMPÍRICAS,
HUARAZ, ANCASH**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AGRÍCOLA**

Presentado por:

Bach. PALMA QUITO, MARTIN EDUARDO REY

Asesor:

Dr. APARICIO ROQUE, Fidel Gregorio

Huaraz, Perú

2022



FORMATO DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN, CONDUCENTES A
OPTAR TÍTULOS PROFESIONALES Y GRADOS ACADÉMICOS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

1. Datos del autor:

Apellidos y Nombres: _____

Código de alumno: _____ Teléfono: _____

E-mail: _____ D.N.I. n°: _____

(En caso haya más autores, llenar un formulario por autor)

2. Tipo de trabajo de investigación:

Tesis Trabajo de Suficiencia Profesional

Trabajo Académico Trabajo de Investigación

Tesinas (presentadas antes de la publicación de la Nueva Ley Universitaria 30220 – 2014)

3. Para optar el Título Profesional de:

4. Título del trabajo de investigación:

5. Facultad de: _____

6. Escuela o Carrera: _____

7. Línea de Investigación (*): _____

8. Sub-línea de Investigación (*): _____

() Según resolución de aprobación del proyecto de tesis*

9. Asesor:

Apellidos y nombres _____ D.N.I n°: _____

E-mail: _____ ID ORCID: _____

10. Referencia bibliográfica: _____

11. Tipo de acceso al Documento:

Acceso público* al contenido completo.

Acceso restringido** al contenido completo

Si el autor eligió el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad Santiago Antúnez de Mayolo una licencia no exclusiva, para que se pueda hacer arreglos de forma en la obra y difundirlo en el Repositorio Institucional, respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.

En caso de que el autor elija la segunda opción, es necesario y obligatorio que indique el sustento correspondiente:



12. Originalidad del archivo digital

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad, como parte del proceso conducente a obtener el título profesional o grado académico, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado.



Firma del autor

13. Otorgamiento de una licencia *CREATIVE COMMONS*

Para las investigaciones que son de acceso abierto se les otorgó una licencia Creative Commons, con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a la obra, bajo los términos que dicha licencia implica.



El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.

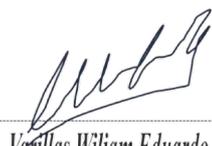
Según el inciso 12.2, del artículo 12º del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales - RENATI "Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Recolector Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA".

14. Para ser verificado por la Dirección del Repositorio Institucional

Seleccione la
Fecha de Acto de sustentación:

Huaraz,

Firma:



Varillas William Eduardo
Asistente en Informática y Sistemas

- UNASAM -

***Acceso abierto:** uso lícito que confiere un titular de derechos de propiedad intelectual a cualquier persona, para que pueda acceder de manera inmediata y gratuita a una obra, datos procesados o estadísticas de monitoreo, sin necesidad de registro, suscripción, ni pago, estando autorizada a leerla, descargarla, reproducirla, distribuirla, imprimirla, buscarla y enlazar textos completos (Reglamento de la Ley No 30035).

**** Acceso restringido:** el documento no se visualizará en el Repositorio.





ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los miembros del Jurado de Tesis que suscriben, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, para escuchar y evaluar la sustentación de la Tesis presentada por el Bachiller en Ciencias de Ingeniería Agrícola PALMA QUITO, MARTIN EDUARDO REY, denominada: "ESTIMACION DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACION LOCAL EN EL PUENTE JANGAS MEDIANTE ECUACIONES EMPIRICAS, HUARAZ, ANCASH". Escuchada la sustentación, las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas, la declaramos:

APROBADA

CON EL CALIFICATIVO (*)

DIECISEIS (16)

En consecuencia, el sustentante queda en condición de ser calificado APTO por el Consejo de Facultad de Ciencias Agrarias y por el Consejo Universitario de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" y recibir el título de INGENIERO AGRÍCOLA, de conformidad con la Ley Universitaria y el Estatuto de la Universidad.

Huaraz, 02 de Agosto de 2022.

Dr. TORIBIO MARCOS REYES
RODRIGUEZ

PRESIDENTE

Mag. EUGENIO JULIAN MEJIA
ZUÑIGA

SECRETARIO

Mag. ESTEBAN PEDRO REYES
ROQUE

VOCAL

Dr. FIDEL GREGORIO APARICIO
ROQUE

PATROCINADOR

(*) De acuerdo con el Reglamento de Tesis, éstas deben ser calificadas con términos de: APROBADO CON EXCELENCIA (19 - 20), APROBADO CON DISTINCIÓN (17 - 18), APROBADO (14 - 16), DESAPROBADO (00 - 13).





UNIVERSIDAD NACIONAL
SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO

"Una Nueva Universidad para el Desarrollo"

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

CIUDAD UNIVERSITARIA DE SHANCAYÁN TELEFAX 043 426 588 - HUARAZ - ANCASH - PERÚ



ACTA DE CONFORMIDAD DE TESIS

Los miembros del jurado, luego de evaluar la tesis denominada: "ESTIMACION DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACION LOCAL EN EL PUENTE JANGAS MEDIANTE ECUACIONES EMPIRICAS, HUARAZ, ANCASH", presentada por el Bachiller en Ciencias de la Ingeniería Agrícola PALMA QUITO, MARTIN EDUARDO REY, y sustentada el día 02 de agosto del 2022, por Resolución Decanatural N° 298 -2022 - UNASAM - FCA, la declaramos CONFORME.

Huaraz, 02 de agosto de 2022

Dr. TORIBIO MARCOS REYES
RODRIGUEZ

PRESIDENTE

Mag. EUGENIO JULIAN MEJIA
ZUÑIGA

SECRETARIO

Mag. ESTEBAN PEDRO REYES
ROQUE

VOCAL

Dr. FIDEL GREGORIO APARICIO
ROQUE

PATROCINADOR



MIEMBROS DEL JURADO

**Dr. TORIBIO MARCOS REYES
RODRIGUEZ**
PRESIDENTE



**Mag. EUGENIO JULIAN MEJIA
ZUÑIGA**
SECRETARIO



**Mag. ESTEBAN PEDRO REYES
ROQUE**
VOCAL

DEDICATORIA

A Dios por permitirme lograr esta meta, por guiarme y encaminarme durante estos años, por ser el forjador de mi vida, por darme su amor infinito y acompañarme desde siempre.

A mi amada madre Delia Olga Quito Camones por darme la vida y brindarme su amor día a día, demostrándome que siempre podré contar y confiar en ella, por ello y mucho más siempre creeré que es la mejor del mundo, eres mi orgullo.

A mi amado padre Pedro Eduardo Palma Vergara por enseñarme a ser fuerte y resiliente ante las adversidades y obstáculos, y por motivarme a seguir siempre adelante.

A mi amada hermana María Cristina Palma Quito por ser el empuje y motivo de superarme día a día en todos mis propósitos, sé que serás una gran profesional.

AGRADECIMIENTO

- *Indudablemente gracias a Dios, por brindarme fuerzas día a día, por cuidarme a mí y cuidar de mi familia, por darme salud para seguir adelante en mis metas, por darme sabiduría y templanza, para afrontar las adversidades, y, sobre todo, por estar siempre conmigo.*
- *A mi alma mater, la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, por abrirme sus puertas, a la Facultad de Ciencias Agrarias y a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por impartirme conocimiento dentro y fuera de sus claustros, por ello siempre seré orgullosamente Santiaguino.*
- *El eterno agradecimiento a mi Asesor de Tesis el Dr. APARICIO ROQUE FIDEL GREGORIO, por guiarme y aconsejarme con su conocimiento y experiencia como el gran profesional que es, pero, sobre todo, por su amistad incondicional.*
- *A mis jurados, el Dr. TORIBIO MARCOS REYES RODRIGUEZ, Mag. EUGENIO JULIAN MEJIA ZUÑIGA, Mag. ESTEBAN PEDRO REYES ROQUE, quienes supieron instruirme y orientarme antes y durante la ejecución de esta tesis.*
- *Al Ingeniero CESAR DANIEL MILLA VERGARA por ser una gran persona y gran profesional, por su amistad, mi eterna consideración a su persona, descanse en paz.*
- *A todas las personas que estuvieron presente durante mi formación profesional, quienes, con su amistad, cariño, apoyo, soporte y consejos, me permitieron seguir adelante con mis estudios y crecer como persona, siempre los recordaré con respeto, estima, pero, sobre todo, con mucha gratitud.*

INDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
INDICE.....	iv
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Realidad de la Problemática.....	1
1.2. Formulación del Problema	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo General.....	2
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4. Variables.....	3
1.4.1. Variables Predictoras	3
1.4.2. Variable Predicha.....	3
1.5. Hipótesis.....	3
1.6. Justificación.....	3
II. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes del Tema	5
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	5
2.1.2. Antecedentes Nacionales	7
2.1.3. Antecedentes Locales.....	9

2.2.	Bases Teóricas	10
2.2.1.	Periodo de Retorno en Puentes	10
2.2.2.	Caudal de Diseño	11
2.2.3.	Socavación	14
2.3.	Definición de Términos.....	26
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1.	Materiales y Equipos.....	29
3.2.	Metodología	29
3.2.1.	Tipo de Investigación.....	29
3.2.2.	Diseño de la Investigación.....	29
3.2.3.	Universo.....	30
3.2.4.	Muestra	30
3.2.5.	Técnicas de Recolección de Datos.....	30
3.2.6.	Instrumentos de Recolección de Datos	31
3.2.7.	Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos.....	31
3.3.	Validación	36
3.4.	Procedimiento de Análisis de Datos.....	36
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
4.1.	Resultados	52
4.1.1.	Características Geomorfológicas de la Cuenca de Aporte.....	52
4.1.2.	Caudal Máximo de Diseño.....	52

4.1.3.	Análisis Granulométrico por Tamizado.....	53
4.1.4.	Características Hidráulicas.....	54
4.1.5.	Estimación de la Socavación Local mediante Métodos Empíricos	54
4.1.6.	Resumen de Profundidades de Socavación Local estimadas.....	59
4.1.7.	Comparación y Predicción de Socavación.....	60
4.2.	Discusión.....	61
4.2.1.	Geometría de los Estribos del Puente Jangas.....	62
4.2.2.	Características Geomorfológicas de la Cuenca de Aporte.....	61
4.2.3.	Caudal Máximo de Diseño.....	61
4.2.4.	Mecánica de Suelos.....	62
4.2.5.	Hidráulica.....	63
4.2.6.	Socavación Local	64
V.	CONCLUSIONES.....	66
VI.	RECOMENDACIONES	67
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
VIII.	ANEXOS.....	72
	ANEXO 1: Plano de Ubicación del Puente Jangas.....	72
	ANEXO 2: Mapa de Subcuencas del Área de Estudio	73
	ANEXO 3: Plano Topográfico del Área de Estudio	74
	ANEXO 4: Plano del Puente Jangas	75
	ANEXO 5: Granulometría del Material de Lecho	76

ANEXO 6: Coeficiente de Rugosidad (n) de Manning	80
ANEXO 7: Modelamiento Hidráulico del Tramo de Estudio.....	82
ANEXO 8: Características Hidráulicas del Tramo de Estudio	83
ANEXO 9: Plano de Secciones Transversales del Río Santa	86
ANEXO 10: Fotos de la Visita de Campo al Puente Jangas.	87

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Valores Máximos Recomendados de Riesgo Admisible de Obras de Drenaje.	11
Tabla 2.2 Coeficiente de Corrección $K\theta$, Método de Artamonov.	22
Tabla 2.3 Coeficiente de Corrección KQ , Método de Artamonov.	22
Tabla 2.4 Coeficiente de Corrección Km , Método de Artamonov.	23
Tabla 2.5 Coeficiente por Forma del Estribo Kf , Método de Froehlich.	24
Tabla 4.1 Caudales Máximos de Diseño para T=500 años.	53
Tabla 4.2 Características Hidráulicas Aguas Arriba del Puente Jangas.	54
Tabla 4.3 Socavación en el Estribo Izquierdo, Método de Liu, Chang y Skinner.	55
Tabla 4.4. Socavación en el Estribo Izquierdo, Método de Artamonov.	56
Tabla 4.5 Socavación en el Estribo Izquierdo, Método de Froehlich.	57
Tabla 4.6 Socavación en el Estribo Izquierdo, Método de Laursen.	58
Tabla 4.7 Socavación en el Estribo Izquierdo, Método de Hire.	58
Tabla 4.8 Resumen de Profundidades Estimadas de Socavación Local.	59
Tabla 4.9 Comparación de Alturas de Socavación Local en el Estribo Izquierdo.	60
Tabla 8.1 Valores de Variables Según Condiciones del Canal, Método de Cowan.	80
Tabla 8.2 Valores de Coeficientes Según Condiciones del Margen Derecho.	81
Tabla 8.3 Valores de Coeficientes Según Condiciones del Margen Izquierdo.	81

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Intersección de Flujo por los Estribos y Angulo de Ataque.....	21
Figura 3.1 Flujograma para la Estimación y Predicción de Socavación Local en Estribos.....	51
Figura 4.1 Angulo de Ataque en el Puente Jangas.....	56
Figura 8.2 Foto de Medición de Socavación en el Estribo Izquierdo.....	87
Figura 8.3 Foto del estribo derecho.	87

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de investigación fue estimar la profundidad de socavación local en el puente Jangas mediante ecuaciones empíricas en el año 2020, el puente de estudio tiene como ubicación el distrito de Jangas, provincia de Huaraz, departamento de Ancash. Se estableció un periodo de retorno de 500 años para la determinación de los caudales máximos de diseño de Reyes (2009) y del Gobierno Regional de Ancash (2017), estos se validaron mediante el rastro de paleocrecida aguas arriba; se aplicaron los métodos empíricos de estimación de socavación local de Liu, Chang y Skinner, Artamonov, Froehlich, Laursen y Hire, estos métodos se validaron mediante el método de observación directa en campo. Los resultados de las socavaciones estimadas para el estribo izquierdo con el caudal máximo de diseño de Reyes (2009) correspondiente a $734.00 \text{ m}^3/\text{s}$, fueron de 2.00 m., 1.95 m., 3.31 m., 4.08 m. y 12.05 m. mediante los métodos empíricos de Liu, Chang y Skinner, Artamonov, Froehlich, Laursen y Hire, respectivamente; y para el caudal máximo de diseño del Gobierno Regional de Ancash (2017), fueron de 2.01 m., 1.88 m., 3.33 m., 4.06 m. y 11.82 m. respectivamente; asimismo, en el método de observación directa se obtuvo una socavación de 3.10 m. Se concluye que el método de Froehlich es el que mejor se adecua para estimación y predicción de socavación local en el estribo izquierdo del puente Jangas, para el material de lecho clasificado como grava bien graduada.

Palabras Claves: Socavación local, socavación en estribos, socavación en puentes, profundidad de socavación, caudal máximo.

ABSTRACT

The objective of this research work was to estimate the depth of local scour in the Jangas bridge through empirical equations in the year 2020, the study bridge is located in the district of Jangas, province of Huaraz, department of Ancash. A return period of 500 years was established for the determination of the maximum design flows of Reyes (2009) and the Gobierno Regional de Ancash (2017), these were validated by means of the upstream paleoflood trail; Empirical local scour estimation methods of Liu, Chang and Skinner, Artamonov, Froehlich, Laursen and Hire were applied, these methods were validated by direct field observation method. The results of the estimated scours for the left abutment with the maximum design flow by Reyes (2009) corresponding to 734.00 m³/s, were 2.00 m., 1.95 m., 3.31 m., 4.08 m. and 12.05 m. using the empirical methods of Liu, Chang and Skinner, Artamonov, Froehlich, Laursen and Hire, respectively; and for the maximum design flow of the Gobierno Regional de Ancash (2017), were 2.01 m., 1.88 m., 3.33 m., 4.06 m. and 11.82 m. respectively; Likewise, in the direct observation method, an undermining of 3.10 m was obtained. It is concluded that the Froehlich method is the best suited for the estimation and prediction of local scour in the left abutment of the Jangas bridge, for river material classified as well-graded gravel.

Keywords: Local scour, abutment scour, bridge scour, scour depth, maximum flow.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad de la Problemática

La socavación es la mayor causante de fallas en los puentes en todo el mundo, la falta de estudios detallados sobre la eventual erosión en la cimentación de los pilares y/o estribos que cumplen el rol de sostener y dar estabilidad a los puentes, ocasionada por las avenidas máximas, son causantes de fallas estructurales, por ello, se debe evaluar cuidadosamente la profundidad de socavación en cada proyecto, (Felipe, 2016).

El fenómeno del niño en el Perú 1997 – 1998, afectó 370 puentes, y el Niño Costero del 2017 dañó 881 puentes donde 489 fueron destruidos por el considerable caudal que transportaban los ríos, ya que los estudios con los que se diseñaron eran insuficientes o los cálculos de profundidad de socavación y avenidas máximas eran subestimados, (Colegio de Ingenieros del Perú, 1998).

En el año 2017, el puente de la Solidaridad que une los distritos de San Juan de Lurigancho con El Agustino, ubicado en el río Rímac – Lima, debido a la deficiente elaboración del expediente técnico, teniendo problemas graves en los taludes, los cuales estaban sujetos a la socavación, asimismo, por no contar con un adecuado estudio geotécnico, fluvial, hidrológico e hidráulico, provocaron el colapso del estribo izquierdo y como consecuencia el colapso del puente debido al fenómeno del Niño Costero, ocasionando un gran perjuicio social, económico y ambiental (Paz, 2017).

La provincia de Huaraz no es ajena a este problema que aqueja a todas las estructuras hidráulicas, el caso más cercano que se puede apreciar es el puente Calicanto, que, por su antigüedad, materiales que lo constituyen, falta de un

mantenimiento adecuado, y la concentración de residuos sólidos aglomerados por el accionar del ser humano, y otros factores se encuentra vulnerable ante la erosión severa de sus cimientos a causa de los caudales extraordinarios del río Santa, para lo cual se requiere el reforzamiento, protección de sus estribos, del mismo modo se ha clausurado la transitabilidad por ser considerado patrimonio cultural de nuestra ciudad.

El puente Jangas construido en el año 1972, ubicado en el distrito de Jangas, provincia de Huaraz, cuyas coordenadas UTM son 218100.8 E y 8961737.2 S, tiene una longitud de luz total de 70.00 metros, presenta vías de acceso pavimentadas, tiene como material predominante al concreto armado al igual que en sus estribos, que, al ser una estructura civil de suma importancia para la interconexión provincial, en la cual se observa que está sometida a la erosión fluvial, provocando socavación en su estribo izquierdo, por lo cual el presente trabajo de investigación pretende estimar la socavación en el estribo izquierdo mediante ecuaciones empíricas, las cuales han sido validadas mediante el método de observación directa de campo en el año 2020.

1.2. Formulación del Problema

¿Cuál de las ecuaciones empíricas estima mejor la socavación local en el estribo izquierdo del puente Jangas?

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivo General*

Estimar la profundidad de socavación local en el puente de Jangas mediante ecuaciones empíricas.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

- 1) Establecer las características geomorfológicas del área de estudio.
- 2) Calcular el caudal máximo de diseño.
- 3) Determinar las características hidráulicas del río.
- 4) Caracterizar el estribo izquierdo del puente Jangas.
- 5) Comparar la profundidad de socavación local medida en campo con las estimadas mediante las ecuaciones empíricas.

1.4. Variables

1.4.1. *Variables Predictoras*

- Características hidráulicas del río Santa.
- Geometría del estribo izquierdo del puente Jangas.

1.4.2. *Variable Predicha*

Profundidad de socavación local en el estribo izquierdo del puente Jangas

1.5. Hipótesis

Al menos una de las ecuaciones empíricas para la estimación de socavación local en estribos de puentes predecirá la profundidad de socavación local en el estribo izquierdo del puente Jangas.

1.6. Justificación

Los resultados de esta investigación generarán un nuevo conocimiento sobre las ya existentes, asimismo, servirán como un aporte y antecedente para futuras tesis e investigaciones académicas en Ingeniería Agrícola y profesiones afines.

Los métodos de Artamonov (1992), Froehlich (1993), Hire (1993), Liu, Chang y Skinner (1961), y Laursen (1993), son considerados por el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje, del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008) como métodos para realizar trabajos profesionales e investigaciones, asimismo, estos se validarán mediante el método de observación directa, con la cual se verificará el método empírico que más se adecue a la realidad, y por ende pueden ser empleados en estribos de puentes con características similares en la cuenca del Santa.

Los resultados de la investigación, permitirán resolver un problema fáctico de la estabilidad del puente de Jangas, debido a que en el estribo izquierdo se observa un deterioro grave, lo que conlleva al deterioro de la estructura y pandeo del tablero; este hecho ha sido considerado por defensa civil y el Gobierno Regional para una rehabilitación de dicha estructura. Asimismo, deberán realizarse estructuras de protección para evitar y prevenir futuros desastres que pueden ser ocasionados por un evento extraordinario, y de esa manera, ocasionar un aislamiento entre los pueblos del Callejón de Huaylas.

Esta investigación contribuirá a solucionar el problema real de la socavación del estribo izquierdo, y prevendrá los posibles daños de transitabilidad vehicular y peatonal, y de esta manera, informar a las instituciones pertinentes para la toma de medidas adecuadas con el fin de garantizar la seguridad ante posibles accidentes en un posible colapso del puente.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del Tema

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Mora & Navarro (2015), publicaron en su tesis profesional para obtener el título de Ingenieros Civiles **titulado** “Comparación de diversas metodologías para estimación de socavación en varios puentes de la provincia de Esmeraldas”. **Objetivo:** Estimar la profundidad de la socavación general que presentan diversos ríos aplicando los métodos de Lischtvan Levediev y Laursen, con el fin de compararlos con respecto al sitio de estudio analizado. **Metodología,** la investigación fue de nivel explicativo y de diseño experimental de corte transversal, la población fue conformada por 10 ríos, los cuales fueron el río Guachal, Tonchigue, Bilsa, Repartidero, Maldonado, Aguas Claras y Daule, la muestra fue pila de cada puente ubicado en estos ríos, donde la recolección de datos, comprendió el uso de imágenes satelitales, cálculo de caudales de diseño con periodos de retorno de 100 años, datos geométricos e hidráulicos de los puentes y estudio granulométrico del material de lecho. **Conclusión:** Los métodos no consideran la estratigrafía del área de estudio, y la velocidad junto a la pendiente del cauce tienen relación directa con la socavación.

Bedoya & Cerón (2015), publicaron en su tesis profesional para obtener el título de Ingenieros Civiles **titulado** “Modelación numérica de la socavación local en los estribos del puente sobre el Río Sunuba según las características hidrodinámicas de la zona”. **Objetivo:** Evaluar mediante un modelo numérico el fenómeno de socavación local en los estribos del puente sobre el río Sunuba considerando las características hidrodinámicas del área de estudio.

Metodología: La investigación fue de nivel experimental de corte transversal, la población fue conformada por el río Sunuba, la muestra estudiada en el puente Sunuba, donde se realizó un levantamiento topográfico 100 metros aguas arriba y abajo, así como la determinación de la sección del río, y el resto de parámetros hidráulicos y geométricos, tanto como toma de muestras de material de lecho ubicado en los estribos del puente, y donde se aplicaron los métodos de Liu, Chang y Skinner, Froehlich y Hire por las características del río y puente.

Conclusión: Los métodos empíricos ofrecen resultados de socavación válidas solo para cierta condición de flujo, y no consideran la variable temporal.

Castellanos (2018), publicó en su tesis profesional para obtener el el título de Ingeniero Civil **titulado** “Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería”. **Objetivo:** Estimar la profundidad de socavación general en diversos ríos mediante los métodos de Lischvan Levediev y Laursen, con el fin de compararlos con respecto al área de estudio.

Metodología: La investigación fue de nivel experimental, de corte transversal, la población fue conformada por 10 puentes ubicados en el caño Buque, la muestra estudiada fue la del puente de la vía Bogotá - Villavicencio, donde se empleó el Modelo de Elevación Digital (DEM), con resolución 12.5m x 12.5m, así como las precipitaciones y características hidráulicas del río analizado.

Conclusión: El proceso de socavación es muy alto cuando se tiene mayor caudal, por ello se requieren obras de protección.

2.1.2. *Antecedentes Nacionales*

Chirinos (2017), publicó en su tesis profesional para obtener el título de Ingeniera Civil **titulado** “Estudio de socavación de la subestructura de puente y análisis de estabilidad – caso puente Nicolás Dueñas de la ciudad de Lima en el 2017”. **Objetivo:** Determinar la influencia socavación en el análisis de estabilidad de la subestructura y demostrar que posterior a dicho suceso el puente Nicolás Dueñas entra en un proceso de inestabilidad. **Metodología:** La investigación fue del tipo aplicado, con un nivel explicativo y de diseño experimental de corte transversal, la población fue conformada por 5 puentes que se ubican en el río Rímac, los cuales fueron el Puente Nestor Gambetta, Elmer Faucett, Bella Unión, Nicolás Dueñas y Caqueta, la muestra fue la subestructura del puente Nicolás Dueñas, donde la recolección de datos, comprendió la evaluación y análisis de documentación pluviométrica, cartográfica e hidrométrica, el trabajo de campo fue para la observación y análisis de relieve, aspectos hidráulicos, morfo hidrológicos y la granulometría del lecho, y posteriormente se hizo la estimación de parámetros hidráulicos. **Conclusión:** La socavación general estimada para los caudales máximos históricos según Gumbel es de 2.84 m. para un periodo de retorno de 500 años por el método de Lischtvan – Levediev y la socavación local en estribos es de 5.09 m. por el método de Froehlich.

Esteves (2018), publicó en su tesis profesional para obtener el título de Ingeniero Civil **titulado** “Evaluación de métodos para el cálculo de la socavación en puentes. Caso del puente sobre el río Shanusi en el distrito de Yurimaguas, provincia del Alto Amazonas, 2018”, **Objetivo:** Determinar el mejor método para el cálculo de la profundidad de socavación general y en

estribos que represente adecuadamente las condiciones del lecho del río Shanusi. **Metodología:** La investigación fue del tipo descriptivo explicativo, no experimental, con toma de datos transversal, la población fue conformada secciones transversales del río Shanusi, la muestra fue la sección transversal 0-950 del río Shanusi, donde la recolección de datos, comprendió el uso de imágenes satelitales del río, datos de caudales máximos, levantamiento topográfico 500.00 metros aguas arriba y 250.00 metros aguas abajo, el trabajo de campo fue para la observación e identificación de la ubicación del puente, al fase de gabinete comprendió realizar los planos, análisis estadístico de caudales máximos y obtención de socavación general y localizada de la cimentación del puente mediante los métodos de velocidad crítica y agua clara, método de Litchvan-Levediev y método de Laursen como para la socavación en estribos: método de Liu, Chang y Skinner, método de Artamonov, método de Laursen, método de Froehlich, método de Melville y método de HIRE mediante el modelamiento hidráulico en los programas ArcGis y HEC-RAS. **Conclusión:** Los métodos de cálculo de la altura de socavación que mejor se adecuan a la cuenca del Río Shanusi son: el método de Lichtvan-Levediev para la socavación general mientras que el método de Artamanov para la socavación local en estribos seleccionados a partir de la simulación de la socavación general como en estribos en el tiempo de retorno de 140 años.

Aguinaga (2019), publicó en su tesis profesional para obtener el título de Ingeniero Civil **titulado** “Estudio de la socavación en los estribos del puente Cascajal - Olmos ante máximas avenidas”, **Objetivo:** Evaluar el estudio de la socavación del puente Cascajal- Olmos ante máximas avenidas, enfocado desde la hidrología e hidráulica aplicada en puentes. **Metodología:** la investigación

fue del tipo cuantitativo, de diseño experimental, con toma de datos transversal, la población y muestra fueron los estribos del puente Cascajal – Olmos, donde la recolección de datos, comprendió la extracción de muestras a través de 5 calicatas en el lecho del río, se extrajo 7 muestras de las 5 calicatas, la primera en el eje del puente, la segunda a la margen izquierda del puente, la tercera, cuarta y quinta se extrajo de la margen derecha del río, la sexta se obtuvo de la cuarta calicata 300.00 m aguas abajo y la séptima muestra se obtuvo 500.00 m aguas arriba del eje de puente, también se realizó el levantamiento topográfico del puente para elaborar los cortes y perfiles, y la socavación se calculó mediante las ecuaciones teóricas de Lui, Chang y Skinner, Artamonov, Laursen, Froehlich y Hire. **Conclusión:** Se compararon las ecuaciones teóricas y las ecuaciones que brinda el HEC-RAS que son Froehlich y Hire, donde se determinó que la ecuación que más se ajusta con la realidad es la de Froehlich.

2.1.3. *Antecedentes Locales*

Tamara (2018), publicó en su tesis profesional para obtener el título de Ingeniero Civil **titulado** “Causas de la socavación del puente Huambacho ubicado en la panamericana norte - propuesta de mejora, distrito de Samanco, Ancash, 2018”, **Objetivo:** Determinar las causas de socavación del puente Huambacho. **Metodología:** El tipo de investigación fue no experimental descriptiva, la muestra y población fueron consideradas la misma, siendo el puente Huambacho. **Conclusión:** La socavación local más crítica fue de 2.94 m. mediante el método de Froelich con un caudal de 132.55 m³/s.

Príncipe (2018), publicó en su tesis profesional para obtener el título de Ingeniera Civil **titulado** “Evaluación de los puentes con socavación ubicados en

la provincia de Yungay- Ancash”. **Objetivo** Determinar el mejor método para el cálculo de la profundidad de socavación general y en estribos que represente adecuadamente las condiciones del lecho del río Shanusi. **Metodología:** La investigación fue aplicada de nivel descriptivo, de diseño no experimental transversal y se tomó como muestra tres puentes: Mancos, Florida y Tara de la provincia de Yungay, de una población que abarca toda la red vial del callejón de Huaylas, la técnica utilizada fue la observación directa y de los ensayos que permitió la evaluación por agentes externos y proceso constructivo. **Conclusión:** la profundidad de socavación estimada para los estribos del puente Mancos y Florida fue de 0.70. m. y 0.60 m. respectivamente mediante el método de Froelich, y para los pilotes del puente Tara fue de 1.20m. y 1.30 m.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. *Periodo de Retorno en Puentes*

Se le denomina periodo de retorno al tiempo probable en que un caudal determinado es igualado o superado una vez cada cierto periodo de años, para optar por un adecuado periodo de retorno a emplear en el diseño de un proyecto u obra se debe considerar la relación de la excedencia de un evento, la vida útil de la estructura y el riesgo de falla admisible, (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

Teniendo en cuenta lo señalado, el MTC plantea la determinación de la probabilidad de riesgo y falla mediante la siguiente expresión:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (2.1)$$

Donde n es la vida útil de la estructura en años, T es el periodo de retorno en años para la misma estructura, y R es la probabilidad de falla admisible.

Según el Manual de puentes del MTC la verificación de socavación en fundaciones del puente mediante inundación se debe considerar un periodo de retorno no mayor de 500 años, (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2016).

El Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del MTC recomienda optar los siguientes valores de riesgo, vida útil y periodo de retorno para el diseño de obras de drenaje, (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

Tabla 2.1

Valores Máximos Recomendados de Riesgo Admisible de Obras de Drenaje.

Descripción	Riesgo Admisible (%)
Puente	25
Alcantarillas de paso de quebradas importantes y badenes	30
Alcantarillas de paso de quebradas menores y descarga de agua de cunetas	35
Drenaje de la plataforma (a nivel longitudinal)	40
Subdrenes	40
Defensas Ribereñas	25

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (pág. 25, 2008).

2.2.2. Caudal de Diseño

Caudal de diseño es el caudal que se elige, teniendo diferentes consideraciones, para dimensionar un proyecto, dentro de diversos criterios se debe considerar el nivel máximo que el agua puede alcanzar, la capacidad que

tiene el encauzamiento, inclusive los niveles de socavación (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

El caudal máximo de diseño se determinará mediante los métodos de regionalización de las descargas máximas instantáneas anuales.

Regionalización de los Caudales Máximos Instantáneos Anuales de la Cuenca del Río Santa. Las ecuaciones de regionalización de caudales que presenta el presente método sirven como medio de diseño y planificación de estructuras hidráulicas, tales como, puentes, bocatomas, defensas ribereñas, así como de prevención en diversos puntos de la cuenca del río Santa, así también, servirán como referencia a considerar para investigaciones similares (Reyes, 2009).

Para la regionalización de los caudales máximos se emplearon datos de caudales máximos instantáneos de diferentes estaciones hidrométricas en la cuenca del Santa, tales como Recreta, Pachacoto, Olleros, Quillcay, Chancos, Llanganuco, Parón, Colcas, Cedros, La Balsa, Quitarasca y Condorcerro con datos desde 1953 hasta 1982 (Reyes, 2009).

A partir de estos caudales se generaron ecuaciones para estimar los caudales máximos instantáneos anuales en el río Santa:

- Para cuencas mayores a 500 km² hasta 10400 km²:

$$Q = 0.978A^{0.726}(1 + 0.56\log(T)) \quad (2.2)$$

$$Q = 0.308A^{0.726}(3.173 + 1.78\log(T)) \quad (2.3)$$

$$Q = 1.592A^{0.726}((\log(T))^{0.336}) \quad (2.4)$$

Donde:

Q = Caudal máximo instantáneo anual (m³/s)

A = Área tributaria de la cuenca (km²)

T = Periodo de retorno (años)

Regionalización de Descargas Máximas en la Cuenca del Río Santa. Para la regionalización se evaluó el comportamiento de 9 subcuencas del río Santa que tienen estaciones de aforo, así como la estación “La Balsa” que controla las descargas de la cuenca del río Santa en el Callejón de Huaylas, (Gobierno Regional de Ancash, 2017):

La regionalización de las descargas máximas instantáneas anuales se realizó en función al Área de drenaje que se presenta en el siguiente cuadro, donde se aplicaron diferentes modelos matemáticos, obteniéndose como modelo matemático regionalizado, el modelo matemático lineal, que resultó con el más alto coeficiente de correlación (Gobierno Regional de Ancash, 2017).

Ecuación:

$$Q_{máxp} = 1.533 + 0.1159A \quad (2.5)$$

Donde:

$Q_{máxp}$: Promedio de las descargas máximas anuales (m³/s)

A : Área de la cuenca colectora en km²

Posteriormente se realizó el análisis de regresión entre los valores adimensionales y los períodos de retorno transformados en logaritmo natural, obteniéndose un coeficiente de correlación altamente significativo (r=0.9993). Dicha ecuación empírica, que representa el modelo regional para estimar las descargas máximas anuales en la Cuenca del río Santa, es el siguiente (Gobierno Regional de Ancash, 2017):

$$Q_{m\acute{a}x, T} = Q_{m\acute{a}xp} \cdot (0.8037 + 0.2562 \ln(T)) \quad (2.6)$$

Donde:

$Q_{m\acute{a}x, T}$: Descarga máxima para el período de retorno T (m³/s).

$Q_{m\acute{a}xp}$: Promedio de la descarga máxima instantánea anual (m³/s).

T : Período de retorno en años.

2.2.3. Socavación

La socavación, considerándose hidráulicamente como un fenómeno, se produce por movimientos vorticosos que suceden en el pie o base de estructuras hidráulicas como en estribos y/o pilares de un puente, vertederos o drenajes, este fenómeno se puede mitigar mediante ciertas medidas de protección, es de suma importancia que se pueda establecer y determinar la ubicación donde se dé la erosión local para poder controlarla, incluso es más importante que cuantificar la erosión, (Rocha, 1998).

La erosión general se produce a lo largo y ancho del cauce fluvial, por ello se considera que la degradación de los cauces es extensa y progresiva, tal como puede suceder aguas debajo de presas que se ubican en ríos, ya que retiene una gran cantidad de sedimentos pero mantiene constantemente el mismo caudal aguas abajo (Rocha, 1998).

La socavación es un fenómeno hidrodinámico considerado como la falla más frecuente que afecta al cimiento de los puentes, es un proceso que ocurre por el paso de avenidas máximas o a largo plazo (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

El proceso de socavación que sufre un puente se puede considerar como erosión total y se puede llegar a estimar, la socavación total combina la socavación en la sección del puente, así como en sus inmediaciones, producida por el estrechamiento del puente, y la erosión local producida por la existencia de pilares y estribos en contacto con la corriente del río. Sin embargo, se debe recordar que la socavación existe aún sin la presencia del puente o alguna estructura, ya que ocurre de manera independiente a lo largo del cauce natural, debido a que existe también la socavación en curvas, la cual se debe considerar al momento de estimar la socavación total (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

El presente trabajo de investigación ahondó en la socavación local debido a los objetivos planteados y fines de investigación, realizando el debido proceso de validación, tanto para los caudales máximos de diseño y para los resultados de las socavaciones estimadas.

Origen de la Erosión en Cauces Fluviales. El origen de la erosión en cauces fluviales se da por las siguientes causas:

Aumento de Caudal. La presencia de una avenida o aumento de caudal provocan el aumento de velocidad que tiene la corriente, así como la fuerza tractiva y el transporte de sedimentos. Es esta una manera de ocasionar erosión local y generalizada en puntos o lugares (Rocha, 1998).

Las avenidas que se suscitaron en los años 1983 y de 1998 provocaron que en diversos tramos del río Piura, Perú, se produzca una profundización de varios metros en el cauce. En los ríos de la selva se

producen frecuentemente variaciones de caudal que producen en los lechos de material fino constantes fenómenos de agradación y degradación. (Rocha, 1998).

Interrupción del Transporte Sólido. Los ríos poseen una tendencia de estado en equilibrio, si este equilibrio se interrumpe por algún motivo o se reduce el aporte de sedimentos, el río puede conservar su capacidad de transporte, si se da este último caso, el río obtiene sedimentos de los lechos fluviales produciendo socavación generalizada y profundización del cauce (Rocha, 1998).

Estrechamiento del Cauce. El estrechamiento del cauce se produce por el encauzamiento del río, estrechando el ancho del tramo fluvial, se da por lo general cuando se ha encauzado el río de manera exagerada. Se suele estrechar excesivamente los ríos por la construcción de puentes, sin importar el origen del estrechamiento, su consecuencia es el aumento de velocidad y de capacidad de transporte que gana la corriente, trae como consecuencia la profundización de los cauces (Rocha, 1998).

Flujo en Curva. En el margen exterior que tiene una curva fluvial, siempre existe tendencia a la erosión, mientras que, en el margen interior existe tendencia a la sedimentación, ambos fenómenos son propios de la misma dinámica fluvial, si se desea contrarrestar el efecto de la erosión, se pueden emplear un sistema de espigones (Rocha, 1998).

Confluencia Fluvial. Según Rocha “Aguas abajo de la sección en la que un río recibe a un afluente más o menos libre de sedimentos

hay tendencia a que se produzca erosión. El mismo fenómeno ocurre aguas abajo de la confluencia de los brazos de un río entrelazado” (Rocha, 1998).

Pilares y Estribos. Si en el cauce de un río se presentan elementos extraños, como un puente, un pilar o estribo, existirá tendencia a generarse erosión local (Rocha, 1998).

Otros. Se puede dar socavación en esquinas o puntas de espigones, así como, en ríos ubicados en dunas de gran altura, también existe tendencia a la socavación aguas abajo de disipadores de energía que generan un salto hidráulico y cuando se producen cortes en meandros (Rocha, 1998).

Socavación Local. La socavación local se produce debido a la presencia de estrechamientos, curvas o estructuras en la corriente de un río, lo que provoca un aumento en la intensidad del flujo capaz de remover el material del lecho. Este tipo de socavación afecta a una zona limitada, caracterizada por una fuerte turbulencia con desarrollo de remolinos y vórtices inducidos por la obstrucción al paso del agua. En el análisis de la socavación local se puede considerar dos escenarios: socavación en agua clara o socavación en lecho móvil. En la socavación en agua clara no existe transporte de sedimentos del lecho desde aguas arriba y por lo tanto no hay reabastecimiento de sedimentos en el hoyo socavado. Alcanza equilibrio cuando el esfuerzo cortante en el lecho es menor que el requerido para el inicio del movimiento de las partículas. Al contrario, en la socavación en lecho móvil existe transporte de sedimentos del lecho desde aguas arriba y por lo tanto parte de este sedimento queda atrapado en el hoyo de socavación.

En este caso la socavación alcanza equilibrio cuando la cantidad de material que es transportado iguala la cantidad de material que es removido (Toapaxi et al., 2015).

A continuación, se describen las generalidades de la socavación local de acuerdo al tipo de obstrucción que se presente:

Socavación Local en Estrechamientos. Se presenta en los sitios del curso de un río donde exista un estrechamiento más o menos brusco. Por ejemplo, en los cimientos de un puente o en un estrechamiento natural a lo ancho del río (Toapaxi et al., 2015).

Socavación Local en Curvas. En las curvas de los cauces, se presenta una mayor velocidad en su parte exterior (parte cóncava), aumentando así, la capacidad de arrastre de sólidos y provocando una mayor profundidad de socavación en esta zona (Toapaxi et al., 2015).

Socavación Local en Pilas. El proceso de socavación alrededor de pilas de puentes es rápido, y se produce debido a la existencia de velocidades mayores alrededor de estas estructuras, provocando la formación de vórtices frontales, laterales y de estela detrás de la pila, los cuales constituyen la principal causa de este tipo de socavación (Toapaxi et al., 2015).

Existen diversos métodos empíricos para estimar la socavación local en estribos, los que se usaron en este trabajo de investigación fueron los siguientes:

Método de Liu, Chang y Skinner. Este método empírico se basa en una ecuación resultante de estudios de laboratorio y análisis

dimensional, realizada en 1961 y se aplica para las siguientes condiciones, tal o como se ilustran en la figura de un puente (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008):

Consideraciones:

- Socavación en lecho móvil.
- Estribos que se proyectan dentro del cauce principal.
- No existe flujo sobre las llanuras de inundación.
- El largo del estribo es menor que 25 veces la profundidad media del agua ($L/h < 25$).
- Flujo subcrítico.
- Lecho del cauce arenoso.
- Las ecuaciones deben ser ajustadas por un factor de corrección K_θ para considerar el ángulo de ataque del flujo (Tabla 2.2).
- Los valores de las profundidades de socavación deben ser incrementados en un 30% cuando se presentan dunas en el cauce de aproximación al estribo.
- Si existe lecho plano o lecho con antidunas, las ecuaciones deben aplicarse tal como se exponen a menos que las antidunas ocurran en el estribo, caso para el cual la profundidad de socavación debe incrementarse en un 20%.

Este método considera parámetros hidráulicos del río y geométricos de los estribos del puente, su rango de uso se da cuando

los estribos están dentro del cauce y flujos subcríticos con lecho arenoso.

Liu, Chang y Skinner plantean la siguiente ecuación para estimar la profundidad de socavación local en estribos.

$$\frac{y_s}{h} = K_f \left(\frac{L}{h}\right)^{0.4} Fr^{0.33} \quad (2.7)$$

Asimismo, se aplicará siguiente ecuación correspondiente al número de Froude.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (2.8)$$

Donde:

y_s : Profundidad de socavación de equilibrio medida desde el nivel medio del lecho hasta el fondo del hoyo de la socavación (m).

h : Profundidad media del flujo aguas arriba en el cauce principal (m).

L : Longitud del estribo y accesos al puente que se opone al paso del agua (m).

Fr : Número de Froude en la sección de aguas arriba.

V : Velocidad media del flujo aguas arriba.

K_f : Coeficiente de corrección por forma del estribo. Es igual a 1.10 para estribos con pared inclinada hacia el cauce y 2.15 para estribos con pared vertical.

Método de Artamonov. Este método empírico permite determinar la profundidad de socavación que se produce al pie de estribos, espolones o espigones (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

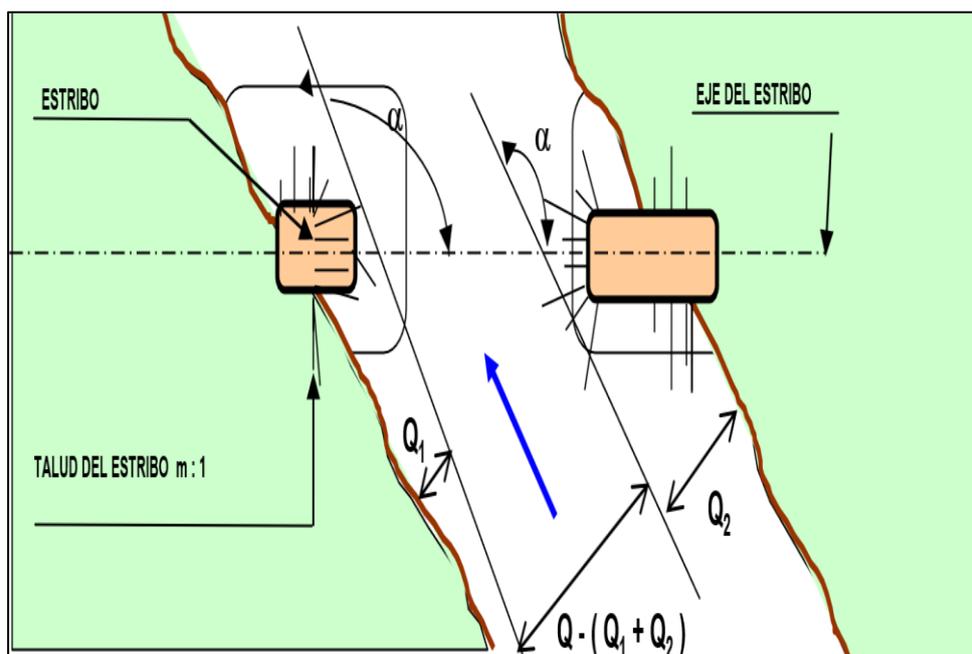
Este método considera parámetros hidráulicos del río y geométricos de los estribos del puente, su rango de uso se da para calcular la socavación en estribos, espolones o espigones.

Depende de los siguientes factores:

- Porción de caudal que es interceptado por la estructura al meterse dentro de la corriente.
- Talud que tienen los lados del estribo (mH:1.0V)
- Ángulo entre el eje longitudinal del puente y la corriente (θ).

Figura 2.1

Intersección de Flujo por los Estribos y Angulo de Ataque.



Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (pág. 146, 2008).

$$H_T = K_\theta K_Q K_m h \quad (2.9)$$

Donde:

H_T : Profundidad del agua al pie del estribo o espigón medida desde la superficie libre de la corriente.

K_θ : Coeficiente que depende del ángulo que forma la corriente con el eje longitudinal del puente (tabla 2.2).

K_Q : Coeficiente que depende de la relación entre el gasto teórico interceptado por el estribo $Q1$ o $Q2$ y el caudal total que escurre por la sección transversal (Tabla 2.3).

K_m : Coeficiente que depende del talud de estribos (Tabla 2.4).

h : Tirante hidráulico de agua en la zona cercana al estribo o al espigón antes de la socavación.

Tabla 2.2

Coeficiente de Corrección K_θ , Método de Artamonov.

θ	K_θ
20°	0.84
60°	0.94
90°	1.00
120°	1.07
150°	1.19

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (pág. 146, 2008).

Tabla 2.3

Coeficiente de Corrección K_Q , Método de Artamonov.

$Q1/QT$	K_Q
0.1	2.00
0.2	2.65
0.3	3.22
0.4	3.45
0.5	3.67
0.6	3.87

$Q1/QT$	K_Q
0.7	4.06
0.8	4.20

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (pág. 146, 2008).

Tabla 2.4

Coficiente de Corrección K_m , Método de Artamonov.

Talud m	K_m
0.00	1.00
0.50	0.91
1.00	0.85
1.50	0.83
2.00	0.61
3.00	0.50

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (pág. 146, 2008).

Método de Froehlich. Es uno de los dos métodos que se utiliza en el modelo Hec-Ras y uno de lo más usados en los EE.UU. Este método empírico se basa en el análisis de regresión de datos de laboratorio para condiciones de lecho móvil, también se recomienda para las dos formas de socavación (*Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008*).

Este método considera parámetros hidráulicos del río y geométricos de los estribos del puente, su rango de uso se da en lecho móvil y agua clara, con estribos dentro o fuera del cauce.

Froehlich plantea la siguiente ecuación:

$$\frac{y_s}{h} = 2.27K_f * K_\theta * \left(\frac{L^i}{h}\right)^{0.43} * Fr^{0.61} + 1 \quad (2.10)$$

Donde:

y_s : Socavación (m).

- K_f : Factor de corrección por la forma del estribo (Tabla 2.5).
- h : Profundidad media del flujo (profundidad hidráulica) en la zona de inundación obstruida por el estribo aguas arriba del puente (m).
- K_θ : Factor de corrección por el ángulo de ataque (ecuación 2.11).
- L^i : Trayecto del estribo que obstruye al flujo (m).
- V : Velocidad media del flujo (m/s).
- Fr : N° de Froude, en la sección de aproximación.

$$K_\theta = (\theta/90)^{0.13} \quad (2.11)$$

Tabla 2.5

Coficiente por Forma del Estribo K_f , Método de Froehlich.

Descripción	K_f
Estribo con pared vertical	1.00
Estribo con pared vertical y aletas	0.82
Estribo con pendiente hacia el cauce	0.55

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (pág. 149, 2008).

Método de Laursen. HEC-18 (1993), Laursen planteó la siguiente ecuación empírica para lecho móvil basándose en la aceleración del flujo causada por el estribo.

Este método considera parámetros hidráulicos del río y geométricos de los estribos del puente, su rango de uso se da cuando los estribos son de paredes verticales, se resuelve por tanteo.

Se deben tomar las siguientes consideraciones para su aplicación:

- Estribos que se proyectan dentro del cauce principal.
- Estribos con pared vertical.
- No existe flujo sobre las llanuras de inundación.
- El largo del estribo es menor que 25 veces la profundidad media del agua ($L/h < 25$).
- Se recomienda que las ecuaciones se apliquen para valores máximos de y_s/h igual a 4.0.
- Las ecuaciones dadas por Laursen se resuelven por tanteos.
- Las ecuaciones deben ser ajustadas por un factor de corrección K_θ para considerar el efecto del ángulo de ataque del flujo.

$$\frac{L}{h} = 2.75 \frac{y_s}{h} \left[\left(\frac{y_s}{11.5h} + 1 \right)^{1.7} - 1 \right] \quad (2.12)$$

Donde:

h : Profundidad media del flujo aguas arriba en el cauce principal.

L : Longitud del estribo y accesos al puente que se opone al paso del agua.

y_s : Profundidad de socavación (m.).

Método de Hire. HEC-18 (1993), incluye otra ecuación empírica desarrollada a partir de datos del Cuerpo de Ingenieros Militares de los Estados Unidos para la socavación que se produce en la punta de los espigones o espolones construidos en el río Mississippi.

Este método considera parámetros hidráulicos del río y geométricos de los estribos del puente, su rango de uso se da para estimar la socavación en las puntas de espigones y estribos.

La ecuación HIRE es por lo tanto aplicable cuando el estribo penetra en el cauce principal (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

$$y_s = 4h \left(\frac{K_f}{0.55} \right) K_\theta Fr^{0.33} \quad (2.13)$$

Donde:

y_s : Profundidad de socavación (m)

h : Profundidad media del flujo al pie del estribo en el cauce principal, considerando la sección transversal inmediatamente aguas arriba del puente (m)

Fr : Número de Froude basado en la velocidad y profundidad al pie justo aguas arriba del estribo.

K_f : Factor de corrección por forma del estribo (Tabla 2.5).

K_θ : Factor de corrección por ángulo de ataque del flujo ecuación (2.11).

2.3. Definición de Términos

Área de la cuenca. Es el área proyectada en un plano horizontal, es de forma irregular y se obtiene luego de la delimitación de la cuenca (Villón Bejar, 2002).

Avenida. Es un incremento considerable y en ocasiones repentino de un curso de agua.

Cauce. Es el área o superficie por donde se desplaza el agua.

Caudal. Es la cantidad de agua que pasa por un punto específico en un sistema hidráulico en un momento o período dado (Aguinaga, 2019).

Cuenca Hidrológica. Es un área de terreno donde las aguas provenientes de precipitación se unen para formar un solo curso (Villón Bejar, 2002).

Delimitación de una Cuenca. La delimitación se realiza sobre un mapa o plano siguiendo las líneas del divortium acuarum (parteaguas), la cuál es una línea imaginaria del divortium, donde se distribuye el escurrimiento proveniente de las precipitaciones que fluye hacia un punto de salida o drenaje de la cuenca (Villón Bejar, 2002)

Estribo. Es la parte de la sub estructura del puente que recibe y soporta las cargas de la estructura (losa del puente) (Aguinaga, 2019).

Fenómeno El Niño. Es el calentamiento anómalo de la temperatura del agua del Pacífico Oriental, que repercute en el clima mundial.

Gaviones. Son cajas de alambre galvanizado armadas in-situ y se rellenan con piedras, usualmente obtenidas del lecho del río. Con la superposición de estos elementos se logra la conformación de muros tipo gravedad de características permeables y flexibles (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

Número de Froude. Es un número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitatorias de un fluido, (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

Paleocrecida. Es un registro geológico o histórico de un caudal excedido que demuestra el aumento de nivel de un río en un periodo anterior.

Pendiente. Es la su inclinación respecto a la horizontal; puede ser ascendente o descendente, según el punto de observación.

Pendiente Media del Cauce. La pendiente del cauce de un río se puede considerar como el cociente que resulta de dividir el desnivel de los extremos del tramo entre la longitud horizontal de dicho tramo.

Profundidad media hidráulica. Es la profundidad que se obtiene al dividir área de la sección transversal entre el ancho superficial.

Puente. Es una estructura construida sobre algún tipo de depresión, falla o accidente geográfico, que permite conectar ambos lados, (Aguinaga, 2019).

Socavación. Es la remoción de materiales del río de un cauce debido a la acción erosiva del flujo de agua alrededor de una estructura hidráulica, (Aguinaga, 2019).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales y Equipos

3.1.1. *Materiales Empleados en Campo*

- Flexómetro.
- Bolsas de plástico.
- Libreta de campo.

3.1.2. *Equipos Empleados en Campo*

- GPS.
- Estación total.
- Mira topográfica.

3.1.3. *Equipos de Gabinete*

- Computadora
- Softwares: Hojas de cálculo – Microsoft Excel, ArcGis, HEC-RAS v. 5.0.7, AutoCAD civil 3D, Google Earth Pro.
- Útiles de escritorio

3.2. Metodología

3.2.1. *Tipo de Investigación*

El tipo de investigación es **aplicada**, ya que su objetivo es resolver problemas prácticos, concretos y específicos, encaminándose en la búsqueda de conocimiento existente para su aplicación, con el fin del desarrollo científico, (Chirinos, 2017).

3.2.2. *Diseño de la Investigación*

El diseño de la investigación es **no experimental**, este diseño permite el estudio de los fenómenos tal como se observan en la realidad, sin que las

variables independientes sean manipuladas directamente por el investigador, con el fin de ser analizados (Chirinos, 2017).

3.2.3. *Universo*

El **universo** de la investigación en estudio comprende todos los puentes que se encuentran en el río Santa.

3.2.4. *Muestra*

La muestra es no probabilística, de tipo intencional, es por esa razón que se eligió el puente Jangas, debido que se observaron problemas de socavación local en la estructura del estribo izquierdo.

3.2.5. *Técnicas de Recolección de Datos*

Observación. Se empleó la técnica de la observación para reconocer y recolectar los datos necesarios en el área de estudio.

Levantamiento Topográfico. Se realizó el levantamiento topográfico 200 m. aguas arriba y 110 m. aguas abajo del puente Jangas, para obtener la información del relieve del suelo, así como del río en el área de estudio y del puente, como se observa en el Anexo 3.

Recolección de Muestra de Suelos. Se realizó la recolección de material de lecho en ambos márgenes del puente Jangas según la siguiente secuencia:

Se realizaron 4 calicatas de 1.5 m. de profundidad aprox. cada una, recolectándose -muestras representativas de 5 kg. en cada calicata, las cuales fueron debidamente etiquetadas.

Modelamiento Hidráulico. Una vez obtenido el plano topográfico, rugosidad de Manning, caudal máximo de diseño, geometría del puente, entre

otros, se procedió a realizar el modelamiento hidráulico mediante el software HEC-RAS v. 5.0.7, con la finalidad de determinar las características hidráulicas requeridas para la estimación de la socavación.

3.2.6. *Instrumentos de Recolección de Datos*

Libreta de Notas. Se utilizó para anotar las características geométricas de los estribos del puente Jangas.

Estación Total. Se utilizó para anotar las características geométricas de los estribos del puente Jangas.

Cartas Nacionales. Son estructuras numéricas que tienen datos que representan la distribución espacial de la altitud en la superficie terrestre, almacenados en una base de datos digital, están georreferenciados en un sistema de proyección cartográfica, y se empleó para la delimitación del área de estudio (Vega & Mas, 2009).

Ficha Técnica de Análisis Granulométrico por Tamizado. Se utilizó para anotar el % de material retenido y que pasa por los tamices en el ensayo de laboratorio ASTM D-422 como se observa en el Anexo 5.

3.2.7. *Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos*

Geomorfología de la Cuenca de Aporte. Se determinaron los parámetros más importantes de la cuenca según la siguiente secuencia:

- Se descargaron cartas nacionales 19h, 19i, 20h, 20i y 21i con escala 1:10,000 que correspondían al área de estudio.
- Se generó el DEM de las cartas nacionales desde ArcGIS.
- Se delimitó el área de estudio teniendo como punto de drenaje el puente Jangas.

- Se obtuvieron los parámetros geomorfológicos principales de la cuenca de aporte, tales como el área, perímetro y pendiente del cauce.

Hidrología. Se determinaron los caudales máximos de diseño mediante la aplicación del método de Regionalización de los Caudales Máximos Instantáneos Anuales, y de Regionalización de Descargas Máximas, de Reyes (2009) y del Gobierno Regional de Ancash (2017) respectivamente, según la siguiente secuencia:

- Se estableció el periodo de retorno de 500 años, según el Manual de Puentes y el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje, del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Se reemplazaron los valores del área de la cuenca de aporte y periodo de diseño en los métodos de regionalización de caudales y avenidas máximas para obtener el Caudal máximo de diseño.
- Se seleccionaron los mayores caudales máximos de diseño de ambos métodos para el periodo de retorno de 500 años.

Topografía. Se realizó el levantamiento topográfico con el fin de obtener información del área de estudio y alrededores correspondientes al puente Jangas, con el cual se obtuvo la superficie del terreno, y el punto de referencia de paleocrecida, tal como se observa en el Anexo 3, según el siguiente proceso realizado:

- Se realizó el levantamiento topográfico de aproximadamente 200 m. aguas arriba y aproximadamente 110 m. aguas abajo.
- Se exportó la “Data” de la estación total hacia Microsoft Excel.

- Se importaron los puntos desde Microsoft Excel hacia AutoCAD Civil 3D.
- Se generó la superficie del terreno en curvas de nivel.
- Se exportó la superficie generada desde AutoCAD Civil 3D hacia ArcGIS.
- Se generó la topografía en ArcGIS.
- Se delimitaron los márgenes y eje central del río, y se generaron los alineamientos centrales y laterales, y secciones transversales del río cada 10m. mediante la extensión Hec GeoRAS de ArcGIS.

Geometría de Estribos. Se realizó la visita de campo para obtener las características geométricas del estribo izquierdo y derecho del puente Jangas, tal como se observa en el Anexo 4, según la siguiente secuencia:

- Se midió el ancho, largo del estribo izquierdo.
- Se midió la altura desde el nivel del estribo izquierdo hasta el fondo del cauce próximo al mismo estribo.
- El estribo derecho no puede ser caracterizado geométricamente porque no es visible debido a que se encuentra soterrado por material de lecho y de la rivera.

Mecánica de Suelos. Se realizó el estudio de suelos con el fin de clasificar granulométricamente el material de lecho, siguiendo la siguiente secuencia:

- Se recolectó las muestras representativas del suelo a una profundidad aproximada de 1,5 m.

- Se realizó el cuarteo de las muestras de suelo, se seleccionaron las muestras, se las llevaron al horno durante 24 horas, cuando las muestras estaban frías y secas se procedió a pesarlas.
- Se tamizaron las muestras usando las mallas 3" (76.200 mm.), 1 ½" (38.100 mm.), ¾" (19.050 mm.), 3/8" (9.525 mm.), N° 4 (4.760 mm.), N° 8 (2.380 mm.), N° 16 (1.190 mm.), N° 30 (0.590 mm.), N° 50 (0.297 mm.), N° 100 (0.149 mm.) y N° 200 (0.074 mm.).
- Se pesaron las fracciones de material retenido en cada malla, se determinaron los porcentajes acumulados retenidos y que pasan.
- Se clasificó el material por su granulometría según la norma ASTM D2487-11.

Coefficiente de Rugosidad (n) de Manning. El coeficiente de Manning se determinó mediante el método de Cowan, en el margen derecho e izquierdo del río Santa en el tramo de estudio, el cual dependió de diversos factores como la granulometría de material de lecho, vegetación, geomorfología y características geométricas propias de los cauces naturales, según la siguiente secuencia, tal como se observa en el Anexo 6.

- Se establecieron los factores correspondientes al material involucrado conociendo la clasificación granulométrica de las muestras de suelos en los márgenes del río Santa.
- Se establecieron los factores correspondientes al grado de irregularidad del cauce mediante la visita de campo y vista satelital en Google Earth en los márgenes del río Santa.

- Se establecieron los factores correspondientes a las variaciones de la sección transversal del cauce mediante la visita de campo y vista satelital en Google Earth en el río Santa.
- Se establecieron los factores correspondientes al efecto relativo de las obstrucciones en el cauce mediante la visita de campo.
- Se establecieron los factores correspondientes a la vegetación en las riberas del río mediante la visita de campo.
- Se establecieron los factores correspondientes al grado de efectos por meandro del río mediante la visita de campo y vista satelital en Google Earth.
- Se determinó el coeficiente de rugosidad Manning (n) para el tramo de estudio.

Modelamiento Hidráulico con el Software Hec-Ras. Se definieron los parámetros hidráulicos y geométricos del río Santa aguas arriba y abajo del Puente Jangas mediante el modelamiento hidráulico usando el software HEC-RAS v. 5.0.7 donde se realizó el siguiente procedimiento, tal como se muestra en el Anexo 7:

- Se importaron los alineamientos y secciones transversales del ArcGIS hacia HEC-RAS v. 5.0.7.
- Se estableció la geometría del puente en HEC-RAS v. 5.0.7.
- Se ingresó la rugosidad (coeficiente de Manning), estimada con el método de Cowan.
- Se ingresó el Caudal máximo de diseño.
- Se ingresó la pendiente media del cauce en estudio, aguas arriba y abajo.

- Se ejecutó la simulación bajo un régimen de flujo permanente, ya que permite definir el entorno físico del cauce y del puente, así como la interacción de las obstrucciones del puente con el caudal, en condiciones de flujo mixtas ya que se desea hacer el análisis aguas arriba y abajo del puente.

Socavación Local. Se estimaron los valores de la socavación local mediante las ecuaciones empíricas de **Liu, Chang y Skinner, Artamonov, Froehlich, Laursen y Hire.**

3.3. Validación

La validación de los caudales máximos de diseño se realizó mediante la estimación del caudal en la sección hidráulica generada por la cota del rastro de paleocrecida obtenida mediante levantamiento topográfico, tal cota fue considerada como nivel del agua en la sección transversal del río.

La estimación de la profundidad de socavación local se validó mediante una medición en campo de la profundidad socavada en el estribo izquierdo del puente Jangas y comparándola con los resultados obtenidos mediante las ecuaciones empíricas.

3.4. Procedimiento de Análisis de Datos

El procedimiento de análisis de datos para la estimación de la socavación local en el puente Jangas se dio de la siguiente manera:

3.4.1. Método de Liu, Chang y Skinner

Se estimó la socavación en el estribo para este método con la profundidad media del flujo aguas arriba del puente, longitud de estribo, número

de Froude, velocidad media del flujo aguas arriba y el coeficiente de corrección de forma del estribo (descrito en las páginas 20 y 21, aplicado en la Tabla 4.3).

3.4.2. Método de Artamonov

Se estimó la socavación en el estribo para este método con la altura de agua cercana al estribo, coeficiente del ángulo de corriente, coeficiente del gasto interceptado y coeficiente de talud de estribos (descrito en las páginas 21; 22 y 23, aplicado en la Tabla 4.4).

3.4.3. Método de Froehlich

Se estimó la socavación en el estribo para este método con la profundidad de agua cercana al estribo, coeficiente del ángulo de la corriente, coeficiente de forma del estribo, longitud de estribo, velocidad media del flujo y número de Froude (descrito en las páginas 23 y 24, aplicado en la Tabla 4.5).

3.4.4. Método de Laursen

Se estimó la socavación en el estribo para este método con la profundidad media aguas arriba del puente, longitud de estribo, mediante tanteos (descrito en la página 25, aplicado en la Tabla 4.6).

3.4.5. Método de Hire

Se estimó la socavación en el estribo para este método con la profundidad media del flujo al pie del estribo aguas arriba, número de Froude, número de Froude, coeficiente de ángulo de ataque del flujo y el coeficiente de corrección de forma del estribo (descrito en la página 26, aplicado en la Tabla 4.7).

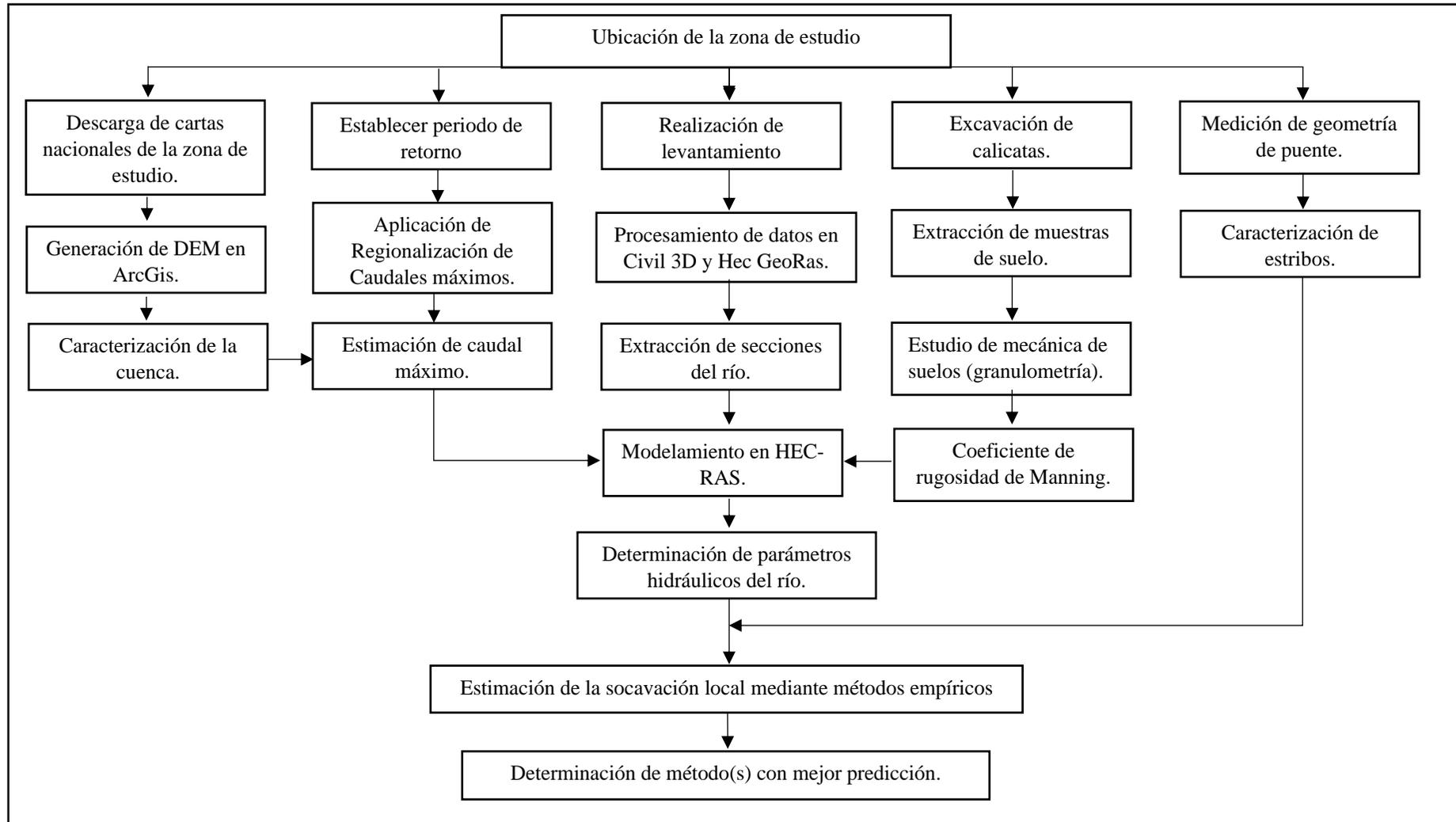
3.4.6. Comparación de la Socavación Local por el Método Directo de Campo y Métodos Empíricos.

Luego de estimar la socavación local en el estribo izquierdo por cada ecuación, se comparó cada valor con la del método directo de campo, con el fin de validar la ecuación con mejor adecuación a la socavación real observada, tal y como se observa en la Tabla 4.9, asimismo, se analizará la variación relativa de cada resultado con respecto a la socavación medida directamente en campo, con el fin de evaluar su predicción.

A continuación, se presenta el flujograma de la metodología aplicada.

Figura 3.1

Flujograma para la Estimación y Predicción de Socavación Local en Estribos.



IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Características Geomorfológicas de la Cuenca de Aporte.

Las características geomorfológicas más importantes de la cuenca de aporte son el área, la cual es de 2,567.45 km², el perímetro, el cual es de 284.27 km, y la pendiente longitudinal media del cauce es 1.21 %.

4.1.2. Caudal Máximo de Diseño

Regionalización de Caudales Máximos Instantáneos Anuales, Reyes (2009). Los caudales máximos de diseño estimados mediante este método son los siguientes:

- $Q_{max} = 0.978 * (2,567.45)^{0.726} (1 + 0.56 \log (500)) = 733.76 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{max} = 0.308 * (2,567.45)^{0.726} (3.173 + 1.78 \log (500)) = 734.00 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{max} = 1.592 * (2,567.45)^{0.726} ((\log (500))^{0.336}) = 663.93 \text{ m}^3/\text{s}$

Siendo el Caudal máximo de diseño para el periodo de retorno de 500 años, 734.00 m³/s.

Regionalización de Descargas Máximas Instantáneas Anuales, Gobierno Regional de Ancash (2017). Se estimó mediante las siguientes ecuaciones:

- $Q_{máxp} = 1.533 + 0.1159 * (2,567.45) = 299.10 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{máx,T} = 299.10 * (0.8037 + 0.2562 \ln(500)) = 716.61 \text{ m}^3/\text{s}$

Caudales Máximos de Diseño. En la siguiente tabla se muestran los caudales máximos de diseño obtenidos por los dos métodos.

Tabla 4.1

Caudales Máximos de Diseño para T=500 años.

T (años)	$Q_{máx1}$ (m ³ /s) (Reyes, 2009)	$Q_{máx2}$ (m ³ /s) (Gobierno Regional de Ancash, 2017)
500	734.00	716.61

La tabla 4.1, muestra los caudales máximos de diseño $Q_{máx1}$ y $Q_{máx2}$, 734 m³/s según Reyes (2009), y 716.61 m³/s según el Gobierno Regional de Ancash (2017), respectivamente.

Asimismo, el caudal generado con la cota del rastro de paleocrecida mediante HEC-RAS v. 5.0.7, ubicado en el kilómetro 0+110 del tramo de estudio es de 659.68 m³/s, cuya sección transversal se muestra en el Anexo 9.

4.1.3. *Análisis Granulométrico por Tamizado*

Los ensayos granulométricos por tamizado del Anexo 5 brindaron los siguientes resultados:

- Más del 50 % de material fue retenido en la Malla N° 200.
- Más del 50 % de material fue retenido en la Malla N° 4.
- Menos del 5% de las muestras pasa el tamiz N° 200.
- El Cu (Coeficiente de uniformidad) de las muestras fue mayor a 4.00.
- El Cc (Coeficiente de curvatura) de las muestras fue mayor a 1.00 y menor a 3.00.

Después de haber seguido este procedimiento el material de lecho se clasifica granulométricamente como Grava bien graduada (GW).

4.1.4. Características Hidráulicas del Tramo de Estudio

Las características hidráulicas del tramo en estudio fueron las siguientes:

➤ Características topográficas:

S_u : Pendiente media aguas arriba del puente = 0.010 m/m.

S_d : Pendiente media aguas abajo del puente = 0.009 m/m.

➤ Rugosidad de Manning (Método de Cowan):

$$n = 0.040$$

Su cálculo se muestra en el Anexo 6.

➤ Caudales de diseño:

Q_{max1} (Reyes, 2009) : 734.00 m³/s

Q_{max2} (Gobierno Regional de Ancash, 2017) : 716.31 m³/s

Los resultados del modelamiento hidráulico en la sección aguas arriba obtenidas mediante el modelamiento hidráulico con HEC-RAS v. 5.0.7, necesarios para el uso de las ecuaciones empíricas, son los siguientes:

Tabla 4.2

Características Hidráulicas Aguas Arriba del Puente Jangas obtenidas mediante HEC-RAS.

$Q_{máx_n}$ (m ³ /s)	Profundidad Media Hidráulica (m)	Profundidad al Pie de Estribo Izq. (m)	Velocidad Promedio (m/s)	Número de Froude de Sección
$Q_{máx1} = 734.00$	2.82	2.02	4.40	0.93
$Q_{máx2} = 716.61$	2.80	1.98	4.38	0.93

4.1.5. Estimación de la Socavación Local mediante Métodos Empíricos

Método de Liu, Chang y Skinner. Se aplicó la ecuación (2.7), cuyos datos de entrada y resultados se muestran a continuación.

- El coeficiente de corrección por forma del estribo para estribos con pared vertical es de 2.15, por consiguiente:

$$K_f = 2.15$$

Tabla 4.3

Socavación en el Estribo Izquierdo, Método de Liu, Chang y Skinner.

Q_{max_n}	Variable	Unidad	Valor	Socavación (m.)
$Q_{max_1} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$	K_f	-	2.15	2.00
	L	m.	2.50	
	h	m.	2.82	
	Nro. de Froude	-	0.93	
$Q_{max_2} = 716.61 \text{ m}^3/\text{s}$	K_f	-	2.15	2.01
	L	m.	2.50	
	h	m.	2.80	
	Nro. de Froude	-	0.93	

La socavación estimada por el método de Liu, Chang y Skinner para el estribo izquierdo con Q_{max_1} es de 2.00 m., y con Q_{max_2} es de 2.01 m.

Método de Artamonov. Se aplicó la ecuación (2.9), cuyos datos de entrada y resultados se muestran a continuación.

- Se determinó el coeficiente de ángulo de corriente K_θ correspondiente al ángulo entre el flujo y la dirección de los estribos mediante interpolación de valores de la Tabla 2.2. Como se muestra en la Figura 4.1, el ángulo de ataque es de 71° , por lo que su coeficiente de ángulo de corriente K_θ es de 0.96.

Figura 4.1

Angulo de Ataque en el Puente Jangas.



- Se determinó el caudal interceptado por el estribo izquierdo (Q_I) para cada caudal mediante el modelamiento hidráulico, y el coeficiente de corrección K_Q , mediante interpolación en la Tabla 2.3.

- Para $Q_I = 29.85 \text{ m}^3/\text{s}$: $K_Q = 1.006$
- Para $Q_I = 28.74 \text{ m}^3/\text{s}$: $K_Q = 0.991$

- Según la tabla 2.4 de Coeficiente de Corrección K_m de estribo, para talud de estribo = 0, le corresponde un coeficiente $K_m = 1.00$.

Tabla 4.4.

Socavación en el Estribo Izquierdo, Método de Artamonov.

Q_{max_n}	Variable	Unidad	Valor	Socavación (m.)
$Q_{max_I} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$	K_θ	-	0.96	1.95
	Q_I	m^3/s	29.85	
	Q_T	m^3/s	734	
	K_Q	-	1.006	
	K_m	-	1.00	
	h	m.	2.02	

Q_{max_n}	Variable	Unidad	Valor	Socavación (m.)
$Q_{max_2} = 716.61 \text{ m}^3/\text{s}$	K_θ	-	0.96	1.88
	Q_l	m^3/s	28.74	
	Q_r	m^3/s	716.61	
	K_Q	-	0.991	
	K_m	-	1.00	
	h	m.	1.98	

La socavación estimada por el método de Artamonov para el estribo izquierdo con Q_{max_1} es de 1.95 m., y con Q_{max_2} es de 1.88 m.

Método de Froehlich. Se aplicó la ecuación (2.10), cuyos datos de entrada y resultados se muestran a continuación.

➤ Para paredes verticales : $K_f = 1.00$

➤ Para $\theta = 71^\circ$: $K_\theta = (71/90)^{0.13} \Rightarrow K_\theta = 0.97$

Tabla 4.5

Socavación en el Estribo Izquierdo, Método de Froehlich.

Q_{max_n}	Variable	Unidad	Valor	Socavación (m.)
$Q_{max_1} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$	K_f	-	1.00	3.31
	K_θ	-	0.97	
	Li	m.	2.50	
	h	m.	2.02	
	Nro. de Froude	-	0.93	
$Q_{max_2} = 716.61 \text{ m}^3/\text{s}$	K_f	-	1.00	3.33
	K_θ	-	0.97	
	Li	m.	2.50	
	h	m.	1.98	
	Nro. de Froude	-	0.93	

La socavación estimada por el método de Froehlich para el estribo izquierdo con Q_{max1} es de 3.31 m., y con Q_{max2} es de 3.33 m.

Método de Laursen. Se aplicó la ecuación (2.12), cuyos datos de entrada y resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.6

Socavación en el Estribo Izquierdo, Método de Laursen

Q_{max_n}	Variable	Unidad	Valor	Socavación (m.)
$Q_{max1} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$	L	m.	2.50	4.08
	h	m.	2.82	
$Q_{max2} = 716.61 \text{ m}^3/\text{s}$	L	m.	2.50	4.06
	h	m.	2.80	

La socavación estimada por el método de Froehlich para el estribo izquierdo con Q_{max1} es de 4.08 m., y con Q_{max2} es de 4.06 m.

Método de Hire. Se aplicó la ecuación (2.13), cuyos datos de entrada y resultados se muestran a continuación.

- Para paredes verticales : $K_f = 1.00$
- Para $\theta = 71^\circ$: $K_\theta = (71/90)^{0.13} \Rightarrow K_\theta = 0.97$

Tabla 4.7

Socavación en el Estribo Izquierdo, Método de Hire.

Q_{max_n}	Variable	Unidad	Valor	Socavación (m.)
$Q_{max1} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$	h	m.	2.02	12.05
	K_f	-	1.00	
	K_θ	-	0.97	
	Nro. de Froude en estribo	-	0.60	

Q_{max_n}	Variable	Unidad	Valor	Socavación (m.)
$Q_{max_2} = 716.61 \text{ m}^3/\text{s}$	h	m.	1.98	11.82
	K_f	-	1.00	
	K_θ	-	0.97	
	Nro. de Froude en estribo	-	0.60	

La socavación estimada por el método de Hire para el estribo izquierdo con Q_{max_1} es de 12.05 m., y con Q_{max_2} es de 11.82 m.

4.1.6. Resumen de Profundidades de Socavación Local Estimadas

A continuación, se muestra un resumen de las profundidades de socavación local estimadas para el estribo izquierdo, y a su vez, la socavación medida directamente en campo.

Tabla IV.8

Resumen de Profundidades Estimadas de Socavación Local.

Método	Q_{max_n}	Socavación (m.)
Liu, Chang y Skinner	$Q_{max_1} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$	2.00
	$Q_{max_2} = 716.61 \text{ m}^3/\text{s}$	2.01
Artamonov	$Q_{max_1} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$	1.95
	$Q_{max_2} = 716.61 \text{ m}^3/\text{s}$	1.88
Froehlich	$Q_{max_1} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$	3.31
	$Q_{max_2} = 716.61 \text{ m}^3/\text{s}$	3.33
Laursen	$Q_{max_1} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$	4.08
	$Q_{max_2} = 716.61 \text{ m}^3/\text{s}$	4.06
Hire	$Q_{max_1} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$	12.05
	$Q_{max_2} = 716.61 \text{ m}^3/\text{s}$	11.82
Directo - In situ	-	3.10

La Tabla 4.8 muestra las socavaciones en el estribo izquierdo, estimadas por los 5 métodos empíricos planteados y para ambos caudales máximos establecidos, así como, el método de observación directa para su respectivo análisis.

4.1.7. Comparación y Predicción de Socavación

A continuación, se muestra la comparación realizada los entre resultados de los métodos propuestos para T.R. = 500 años, con $Q_{max1} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{max2} = 716.61 \text{ m}^3/\text{s}$, mostrando así, su variación realitva y comentando su predicción.

Tabla 4.9

Comparación de Alturas de Socavación Local en el Estribo Izquierdo.

Método	Q_{max_n}	Socavación (m.)	Variación Relativa (%)	Predicción
Directo - In situ	-	3.10	0	-
Froehlich	Q_{max1}	3.31	6.71	Buena
	Q_{max2}	3.33	7.45	Buena
Laursen	Q_{max1}	4.08	31.51	Regular
	Q_{max2}	4.06	31.03	Regular
Liu, Chang y Skinner	Q_{max1}	2.00	35.47	Mala
	Q_{max2}	2.01	35.29	Mala
Artamonov	Q_{max1}	1.95	37.13	Mala
	Q_{max2}	1.88	39.30	Mala
Hire	Q_{max1}	12.05	288.66	Mala
	Q_{max2}	11.82	281.28	Mala

4.2. Discusión

4.2.1. Características Geomorfológicas de la Cuenca de Aporte

Para poder realizar la delimitación de la cuenca de aporte en el punto de drenaje del puente Jangas se requirieron las cartas nacionales 19h, 19i, 20h, 20i, 21i del Instituto Geográfico Nacional con escala 1:10,000, así como de la ubicación del punto de drenaje ubicado en el puente Jangas con el fin de obtener las características geomorfológicas principales de la cuenca de aporte, tal y como lo realizó Chirinos (2017) en su tesis titulada “*Estudio de socavación de la subestructura de puente y análisis de estabilidad – caso puente Nicolás Dueñas de la ciudad de Lima en el 2017*”.

4.2.2. Caudal Máximo de Diseño

Los métodos empleados para la estimación de caudales máximos de diseño se basan en el área de cuenca de aporte, con un periodo de retorno de 500 años según lo normado.

La estimación de los caudales máximos de diseño por los métodos de Reyes (2009) y del Gobierno Regional de Ancash (2017), responde a las recomendaciones del Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje, y del Manual de Puentes, donde se obtuvieron como caudales máximos de diseño 734.00 m³/s y 716.61 m³/s, con una variación de 2.37% entre estos.

El método de Reyes (2009), a comparación del método del Gobierno Regional de Ancash (2017), considera tres ecuaciones para la estimación del caudal máximo de diseño para cuencas con área comprendida desde 500 km² hasta 10400 km², obteniéndose como resultados 733.76 m³/s, 734.00 m³/s y

663.93 m³/s, considerando como caudal máximo de diseño el mayor valor entre estos, siendo 734.00 m³/s el caudal seleccionado para este método.

Según Reyes (2009), estas ecuaciones permiten estimar el caudal máximo de diseño y aplicarlas en diseños y evaluaciones de infraestructuras como puentes en la cuenca del río Santa, tal y como lo menciona en su investigación sobre Regionalización de los Caudales Máximos en la Cuenca del Río Santa.

La validación de los caudales de 734.00 m³/s y 716.61 m³/s se realizó mediante el caudal generado con la cota del rastro de paleocrecida en la estación 210 del tramo de estudio correspondiente a 659.68 m³/s, existiendo así una variación del 10.13 % y 7.95 % respecto a los caudales máximos de diseño. Este caudal de validación da fiabilidad a los caudales obtenidos para un periodo de retorno de 500 años.

4.2.3. Geometría de los Estribos del Puente Jangas

Durante la visita de campo a los estribos del puente Jangas, se pudieron realizar mediciones al estribo izquierdo, tales como ancho, largo y altura visible, por otro lado, el estribo derecho no se pudo caracterizar geoméricamente debido a que este estribo no es visible porque se encuentra soterrado completamente por material propio de la zona y por vegetación, tal y como se observa en la Figura 8.3.

4.2.4. Mecánica de Suelos

El estudio de mecánica de suelos mediante el ensayo granulométrico por tamizado determinó que el material de lecho en el tramo de estudio del río Santa está clasificado como Grava bien graduada, este resultado influye única y

directamente a la estimación del coeficiente de rugosidad (n) por el método de Cowan, más no como variable directa en los métodos de estimación de socavación local ejecutadas en esta tesis, pero es una característica geotécnica que brinda una referencia de la relación entre el tipo de material de lecho del río Santa y la socavación local en el estribo izquierdo del puente Jangas.

Tal y como menciona Guevara (2016), en su libro titulado “*Cálculo de Socavación en puentes*”, los métodos para estimar la estimar la socavación local no tienden a considerar el diámetro del material de lecho, solo suelen basarse en la geometría de estribos, número de Froude, velocidad de flujo y/o caudal, provocando cierta incertidumbre en sus estimaciones.

4.2.5. *Hidráulica*

El planteamiento, diseño, estudio y evaluación de puentes sobre un río requiere que se tomen en cuenta las características hidráulicas del flujo que pasa por debajo de este, de modo de establecer las características hidráulicas necesarios para una adecuada evaluación de la socavación local en la estructura del puente, estas características hidráulicas requeridas se dan aguas arriba del puente en análisis, ya que son requeridas para la estimación de la socavación local, (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2016).

La pendiente media del tramo del río Santa en estudio fue determinada mediante el levantamiento topográfico aguas arriba (207 m.) y abajo (112 m.)

Rosales (2019), en su tesis titulada “*Modelo de Estimación del Coeficiente de Rugosidad de Manning en Función de la Granulometría en el Río Santa, Sector Recuay - Carhuaz - Ancash, 2019*”, concluye que la rugosidad de Manning promedio en el tramo del río Santa desde Recuay hasta Carhuaz fue

de 0.040, del mismo modo, en este trabajo de investigación se obtuvo que la rugosidad de Manning mediante el método de Cowan es de 0.040 en ambos márgenes del tramo de estudio del río Santa.

Se utilizó el software HEC-RAS v. 5.0.7 para el modelamiento hidráulico unidimensional, simulando condiciones de flujo mixtas debido a que la evaluación de puentes considera el análisis hidráulico aguas arriba y abajo del puente, obteniéndose como resultado que el flujo es subcrítico (Número de Froude < 1) en todas las secciones de estudio aguas arriba, asimismo, la simulación se consideró bajo un régimen de flujo permanente, ya que este permite definir el entorno físico del cauce y del puente, así como la interacción de las obstrucciones del puente con el caudal, tal y como lo describen Cotrina & Hernandez (2017) en su simulación hidráulica.

4.2.6. Socavación Local

Las socavaciones estimadas del estribo izquierdo para el caudal máximo de diseño $Q_{máx1} = 734.00 \text{ m}^3/\text{s}$, fueron de 2.00 m., 1.95 m., 3.31 m., 4.08 m. y 12.05 m. mediante los métodos empíricos de Liu, Chang y Skinner, Artamonov, Froehlich, Laursen y Hire respectivamente; y para el caudal máximo de diseño $Q_{máx2} = 716.61 \text{ m}^3/\text{s}$, fueron de 2.01 m., 1.88 m., 3.33 m., 4.06 m. y 11.82 m. respectivamente; siendo 3.10 m. el valor de la socavación local medida por observación directa en campo en el estribo izquierdo; se aprecia que el método de estimación de socavación local de Froehlich, conjuntamente con el método de Reyes (2009) para el caudal máximo de diseño, se ajusta y predice mejor el proceso de socavación local a comparación de los otros métodos, tal y como lo

menciona Chirinos (2017), quien concluye en su tesis que el método de Froehlich se adecua mejor para la estimación de socavación local en estribos.

La socavación local en el estribo derecho no pudo ser estimada debido a que los métodos de estimación de socavación local requieren las características geométricas del estribo, el cual se encuentra soterrado, y no pudo ser caracterizado.

Se muestra que el método empírico de Froehlich obtuvo una variación de 6.71 % y 7.35 % para los caudales de 734 m³/s y 716.61 m³/s respectivamente, en comparación con la socavación medida en campo.

V. CONCLUSIONES

Del trabajo de investigación realizado se concluye:

- 1) Las características geomorfológicas más relevantes de la cuenca de aporte son el área de 2,567.45 km², perímetro de 284.27 km y la pendiente longitudinal media del cauce correspondiente a 1.21 %.
- 2) Los caudales máximos de diseño para el periodo de retorno de 500 años mediante los métodos de regionalización de caudales máximos aplicados al área de estudio fueron de 734.00 m³/s y 716.61 m³/s.
- 3) Las características hidráulicas aguas arriba en el tramo de estudio son la pendiente media de 1.0%; el coeficiente de rugosidad (*n*) de Manning de 0.040; para los caudales de diseño de 734.00 m³/s y 716.61 m³/s se obtuvo que las profundidades medias fueron de 2.82 m. y 2.80 m. respectivamente, sus velocidades promedio fueron de 4.40 m/s y 4.38 m/s respectivamente, y el número de Froude para ambos caudales fue de 0.93.
- 4) El estribo izquierdo del puente Jangas presenta una longitud de 2.50 m desde el asiento de vigas del puente hacia el río, su ancho es de 5.00 m. y su altura visible desde su superficie hasta el fondo del lecho inmediato es de 3.10 m.
- 5) Se concluye que el método que mejor estima y predice la socavación local en el estribo izquierdo del puente Jangas es el método de Froehlich, con el cual se estimó una profundidad de socavación local de 3.31 m en el estribo izquierdo, para el material de lecho clasificado como grava bien graduada.

VI. RECOMENDACIONES

Del trabajo de investigación realizado se recomienda:

- 1) Validar las ecuaciones empíricas en más zonas y puentes que se encuentren dentro del rango de uso de tales ecuaciones, aplicando los métodos de regionalización de caudales máximos.
- 2) Obtener un registro de paleocrecidas a lo largo del río Santa para analizar el comportamiento de sus caudales máximos.
- 3) Plantear nuevos métodos de estimación de socavación local en estribos que integren variables granulométricas de sedimentos presentes en los puentes.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguinaga Ramírez, H. A. (2019). *Estudio de la socavación en los estribos del puente Cascajal - Olmos ante máximas avenidas* [Universidad Señor de Sipán].
<http://repositorio.uss.edu.pe/handle/uss/6042>
- Bedoya Cistancho, J. S., & Cerón Vivas, S. (2015). *Modelación numérica de la socavación local en los estribos del puente sobre el Río Sunuba según las características hidrodinámicas de la zona.* 169.
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21400/BedoyaCristanchoJuanSebastian2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castellanos Hernández, Y. (2018). Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería [Universidad Santo Tomás]. In *USTA*.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/201712107005>
- Chirinos Sota, F. R. (2017). *Estudio de socavación de la subestructura de puente y análisis de estabilidad – caso puente Nicolás Dueñas de la ciudad de Lima en el 2017* [Universidad Cesar Vallejo].
http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/1411/Chirinos_SFR.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Colegio de Ingenieros del Perú. (1998). *Resumen del informe elaborado por el Colegio de Ingenieros del Perú sobre el Fenomeno del Niño 97- 97.*
https://www.indeci.gob.pe/compend_estad/1998/8.3_res.pdf
- Cotrino Cano, J. W., & Hernandez Genovez, I. W. (2017). *Estudio de la Socavación del*

Proyecto del Puente el Inca en el Río Chorobal del Distrito de Chao Mediante Simulación Numérica Unidimensional [Universidad Privada Antenor Orrego].
<https://hdl.handle.net/20.500.12759/4171>

Esteves, M. (2018). *Evaluación de métodos para el cálculo de la socavación en puentes. Caso del puente sobre el río Shanusi en el distrito de Yurimaguas, provincia del Alto Amazonas, 2018.* In *Lexus* (Vol. 4, Issue None).
[http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/12026/Esteves Manuel Angel Neil.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/12026/Esteves%20Manuel%20Angel%20Neil.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Felipe, E. (2016). *Socavación producida por el río Huallaga al puente Colpa Alta en la provincia de Huánico, utilizando los métodos de Artamonov, Straub y Maza* [Universidad de Piura].
https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2627/MAS_ICIV-L_035.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Gobierno Regional de Ancash. (2017). *Creación del servicio de protección ante el peligro de erosión y encausamiento del río Santa en su margen izquierdo, en el caserío de Kehuapampa - Quechcap, distrito y provincia de Huaraz - Región Ancash* (pp. 1–149). Ministerio de Economía y Finanza.
http://ofi5.mef.gob.pe/appFs/Download.aspx?f=16672_GRAN012_201745_12310.pdf

Guevara Álvarez, M. E. (2016). *Calculo De Socavacion De Puentes.* In U. del Cauca (Ed.), *Socavacion en Puentes* (Primera, 2, p. 84). Lemoine Editores.
https://www.hidrojing.com/wp-content/uploads/Bibliografia/19_SOCAVACION_PUENTES_3_CALCULO.pdf

Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2016). *Manual de Puentes.* In *Ministerio de*

Transporte y Comunicaciones. Ministerio de Transporte y Comunicaciones. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUAL DE PUENTES PDF.pdf

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008). *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje* (Ministerio de Transportes y Comunicaciones (ed.); Ministerio). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. <https://doi.org/10.1038/embor.2012.128>

Mora Dominguez, D. N., & Navarro Carvajal, L. M. (2015). *Comparación de diversas metodologías para estimación de socavación en varios puentes de la provincia de Esmeraldas* [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/30984>

Paz, Ó. (2017, March 22). Puente cayó pese a que Rímac no llegó a caudal máximo histórico. *El Comercio*, 03. <https://elcomercio.pe/lima/puente-cayo-pese-rimac-llego-caudal-maximo-historico-407714-noticia/>

Príncipe Mendoza, J. C. (2018). Evaluación de los puentes con socavación ubicados en la provincia de Yungay- Ancash [Universidad San Pedro]. In *Universidad San Pedro*. <http://repositorio.usanpedro.edu.pe//handle/USANPEDRO/11382>

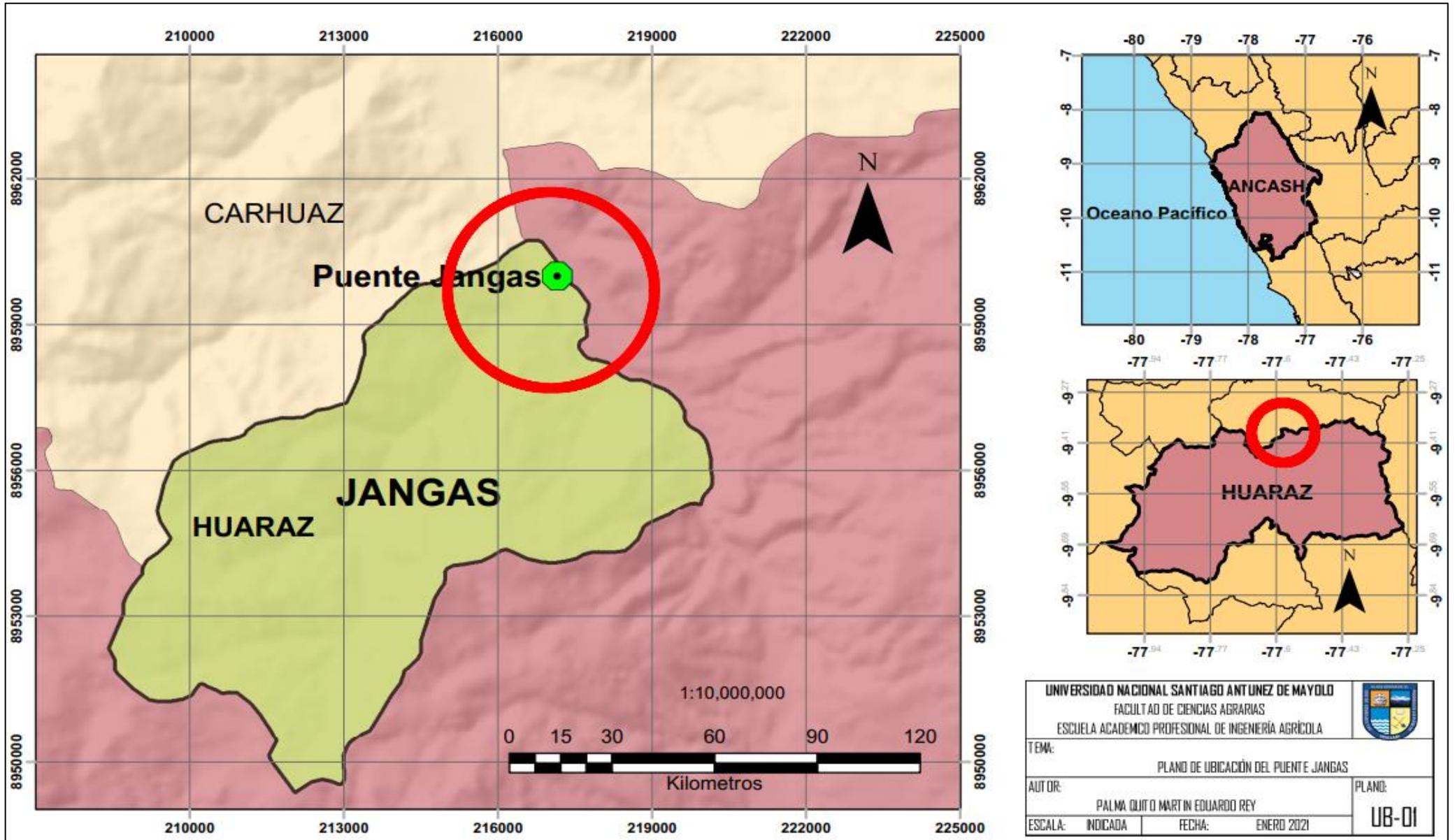
Reyes Rodriguez, T. M. (2009). Regionalización de los Caudales Máximos Instantáneos Anuales de la Cuenca del Río Santa. *APORTE SANTIAGUINO*, 2(2), 223. <https://doi.org/10.32911/as.2009.v2.n2.402>

Rocha Felices, A. (1998). Introducción a Hidráulica Fluvial. In Universidad Nacional de Ingeniería (Ed.), *Universidad Nacional de Ingeniería* (Universidad, Issue November 1998). Universidad Nacional de Ingeniería. http://apiperu.com.pe/wp-content/uploads/presentaciones/articulos-y-libros/hidraulica_fluvial.pdf

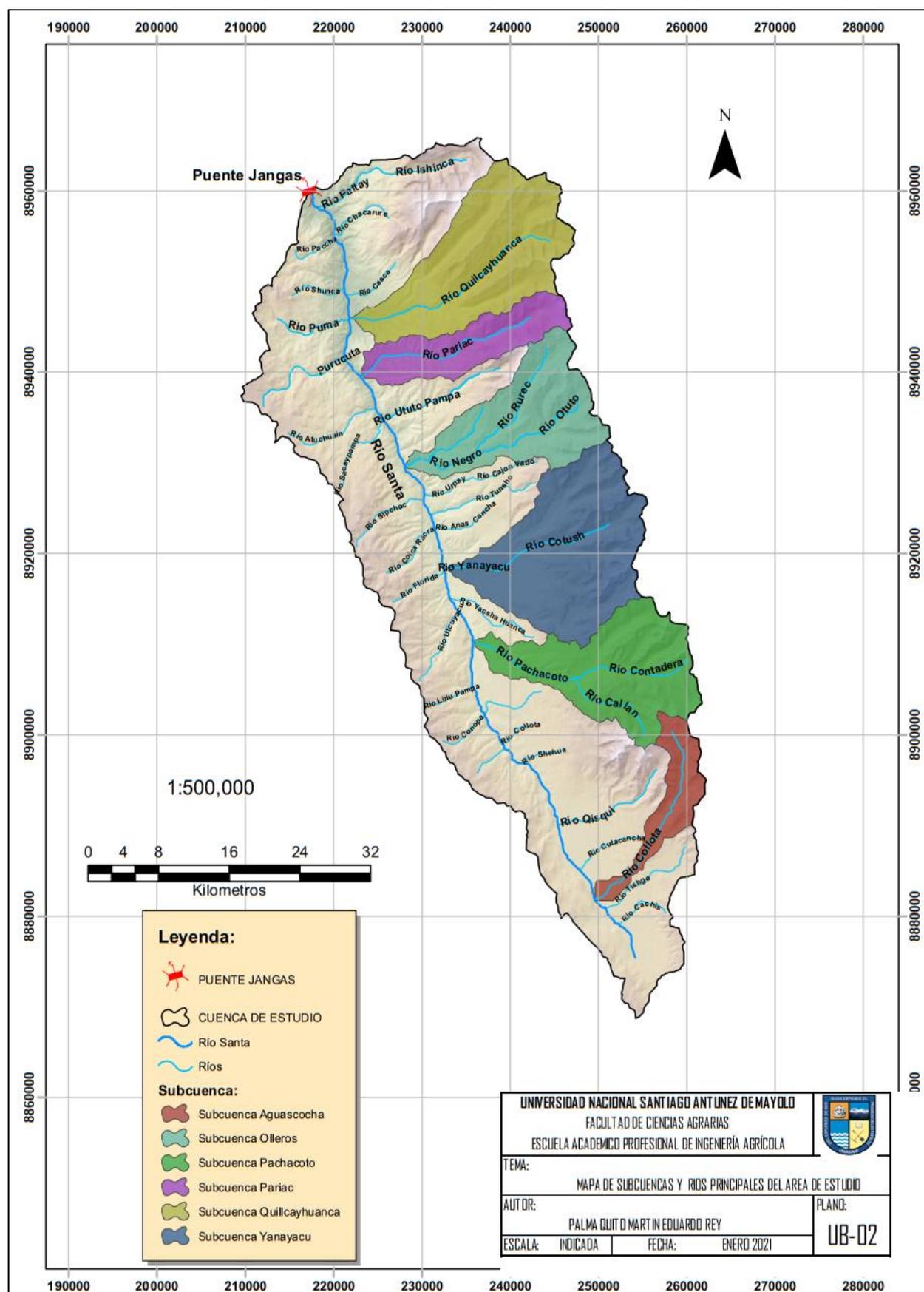
- Rosales Cueva, J. C. (2019). *Modelo de Estimación del Coeficiente de Rugosidad de Manning en Función de la Granulometría en el Río Santa, Sector Recuay - Carhuaz - Ancash, 2019* [Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo]. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4227>
- Tamara Ayala, E. J. (2018). Causas de la socavación del puente Huambacho ubicado en la panamericana norte - propuesta de mejora, distrito de Samanco, Ancash, 2018 [Universidad César Vallejo]. In *Universidad César Vallejo*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/31656>
- Toapaxi, J., Galiano, L., Castro, M., Hidalgo, X., & Valencia, N. (2015). Analisis de la Socavacion en Cauces Naturales. *Revista Politecnica*, 35(3), 11. <https://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen35/tomo3/AnalisisdelaSocavacionenCaucesNaturales.pdf>
- Vega Pérez, A., & Mas François, J. (2009). Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por cuatro métodos de interpolación. *Investigaciones Geograficas*, 69, 53–67. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112009000200005
- Villón Bejar, M. (2002). *Hidrología* (M. Villón Bejar (ed.); Editorial). MaxSoft. <https://es.slideshare.net/erickmainar/hidrologa-ingmximo-villn-53473898>

VIII. ANEXOS

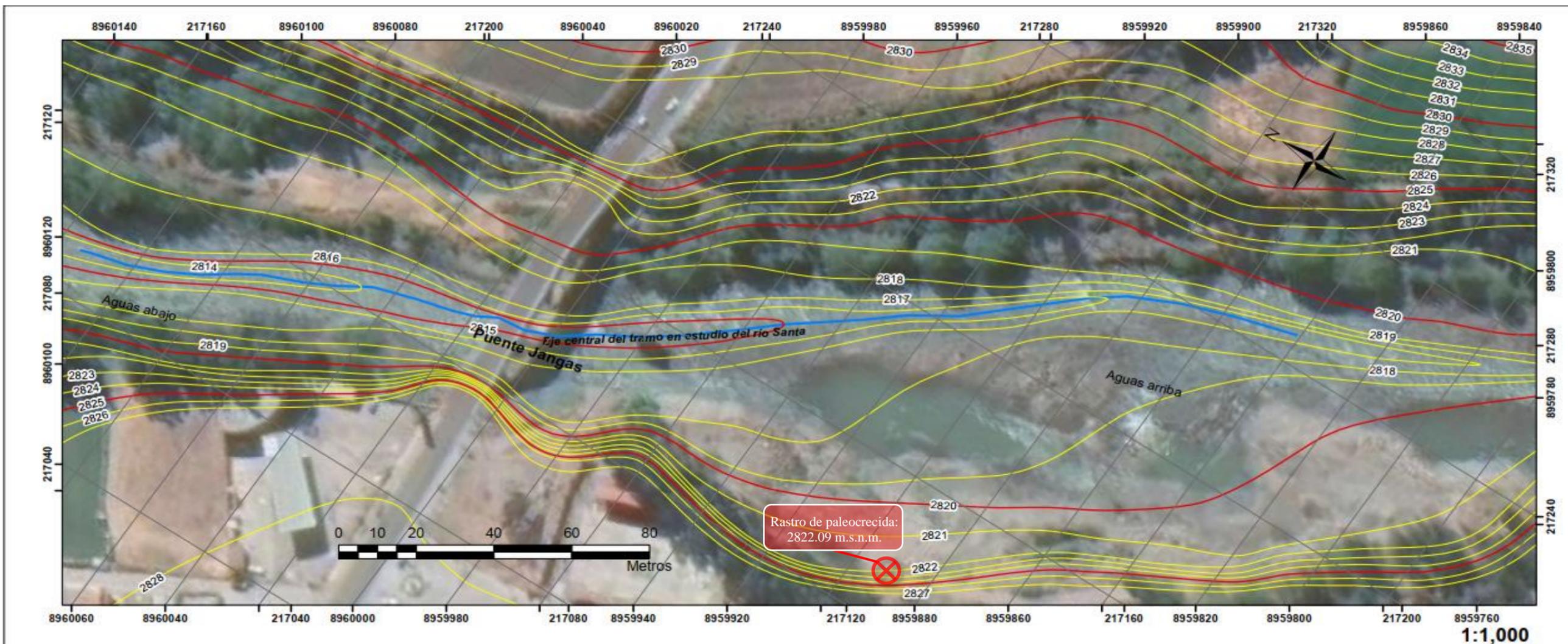
ANEXO 1: Plano de Ubicación del Puente Jangas



ANEXO 2: Mapa de Subcuencas del Área de Estudio

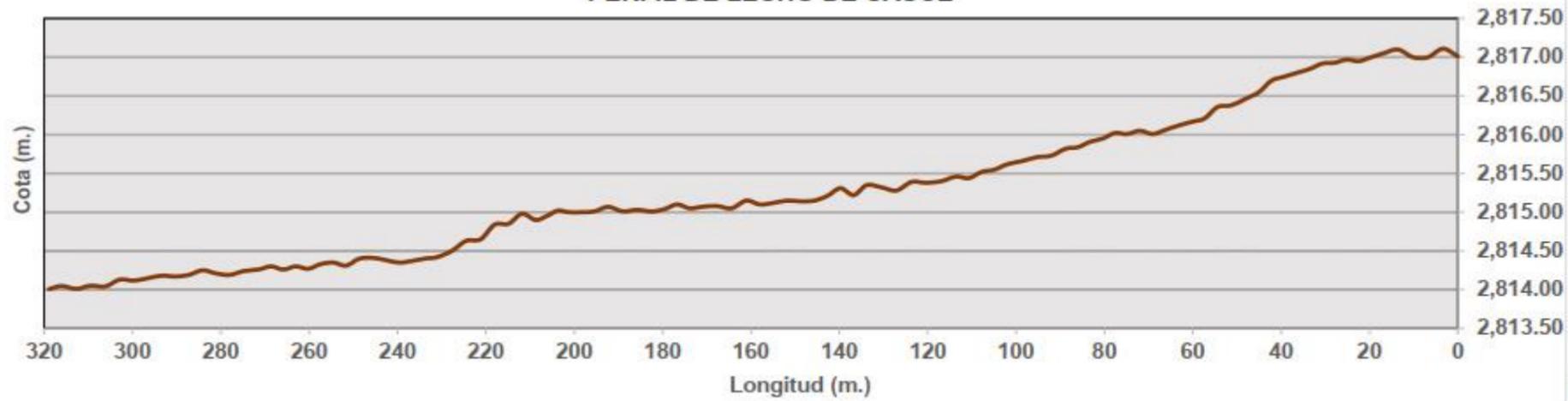


ANEXO 3: Plano Topográfico del Área de Estudio



1:1,000

PERFIL DE LECHO DE CAUCE



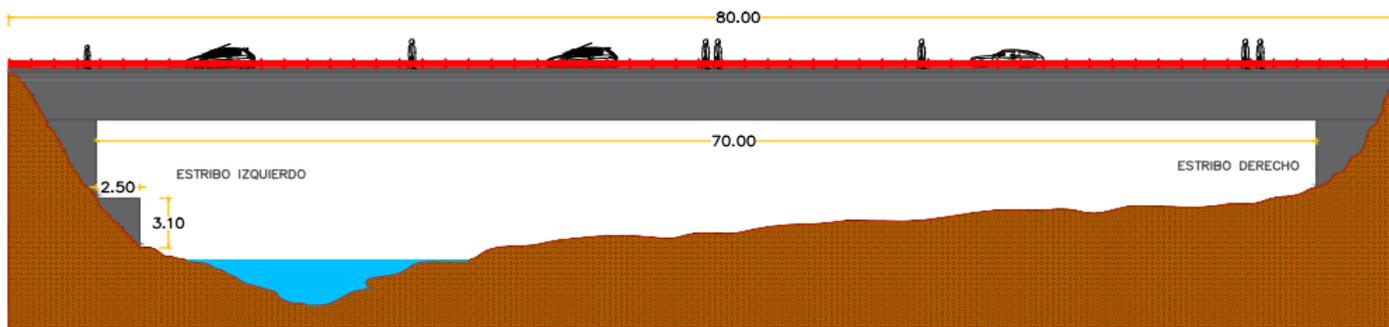
Legenda:

- Eje central del tramo en estudio
- Curvas de nivel:
 - Primarias (5 m.)
 - Secundarias (1 m.)

UNIVERSIDAD NACIONAL SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA		
TEMA: PLANO TOPOGRÁFICO DEL ÁREA DE ESTUDIO		
AUTOR: PALMA QUITO MARTIN EDUARDO REY		PLANO: A-01
ESCALA: INDICADA	FECHA: ENERO 2021	

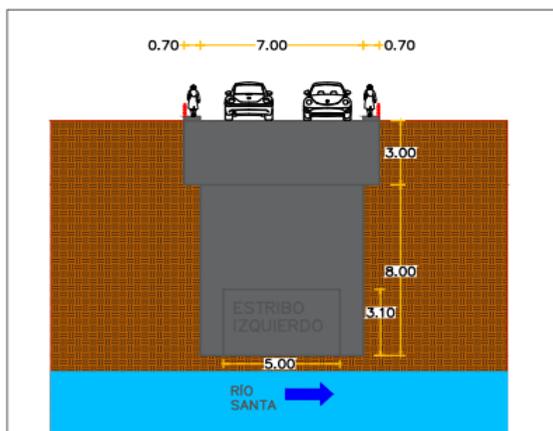


ANEXO 4: Plano del Puente Jangas



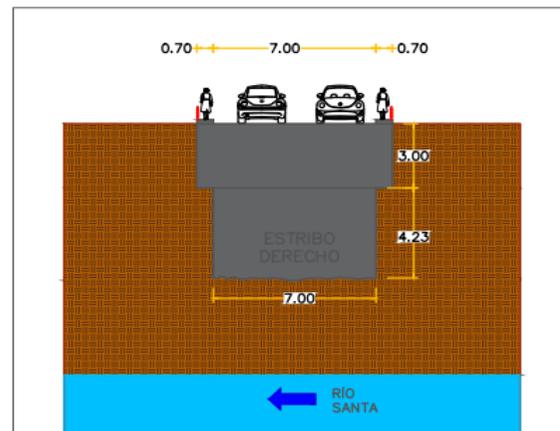
SECCIÓN LONGITUDINAL DEL PUENTE JANGAS

E: 1/400



SECCIÓN TRANSVERSAL DEL ESTRIBO IZQUIERDO

E: 1/300



SECCIÓN TRANSVERSAL DEL ESTRIBO DERECHO

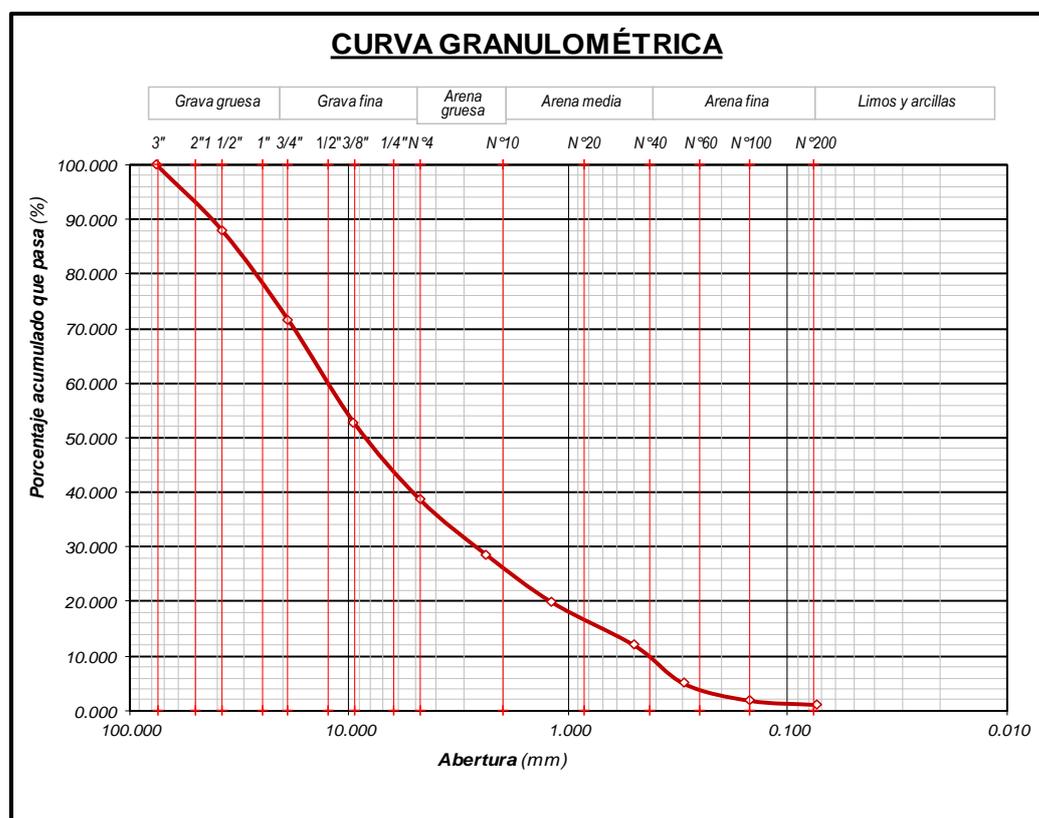
E: 1/300

UNIVERSIDAD NACIONAL SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO		
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA		
TEMA: PLANO DEL PUENTE JANGAS		
AUTOR: PALMA QUITO MARTIN EDUARDO REY		PLANO: A-02
ESCALA: INDICADA	FECHA: ENERO 2021	

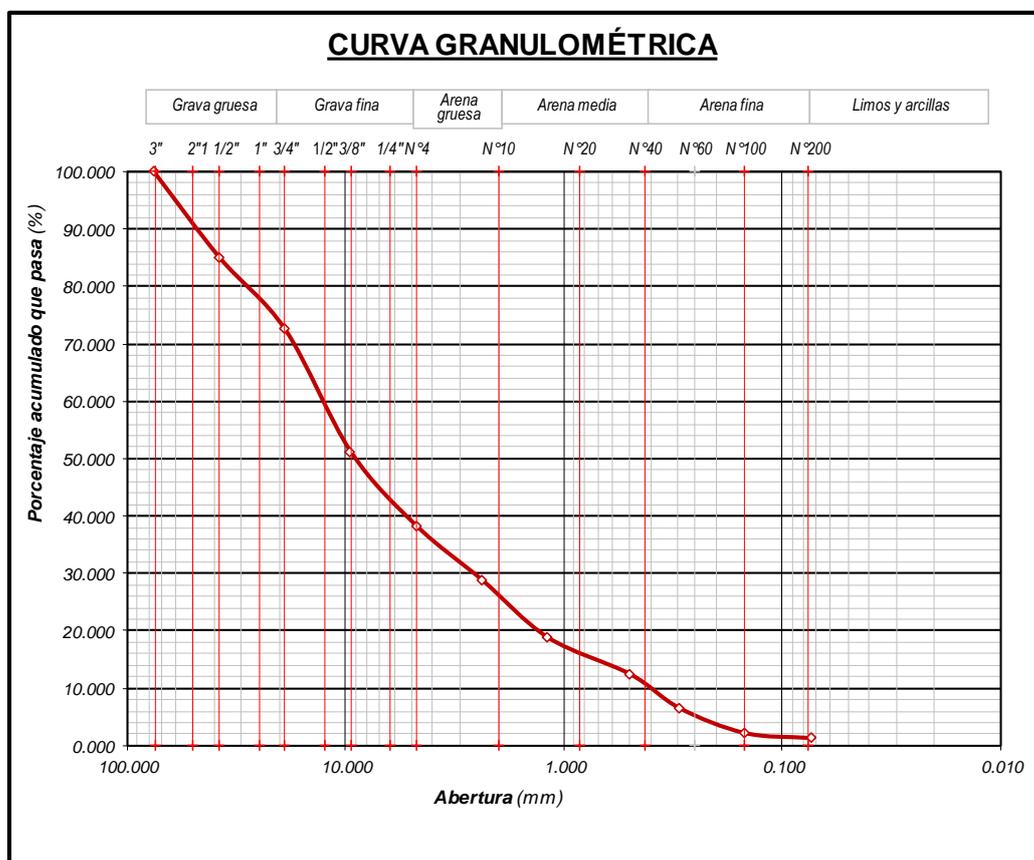


ANEXO 5: Granulometría del Material de Lecho

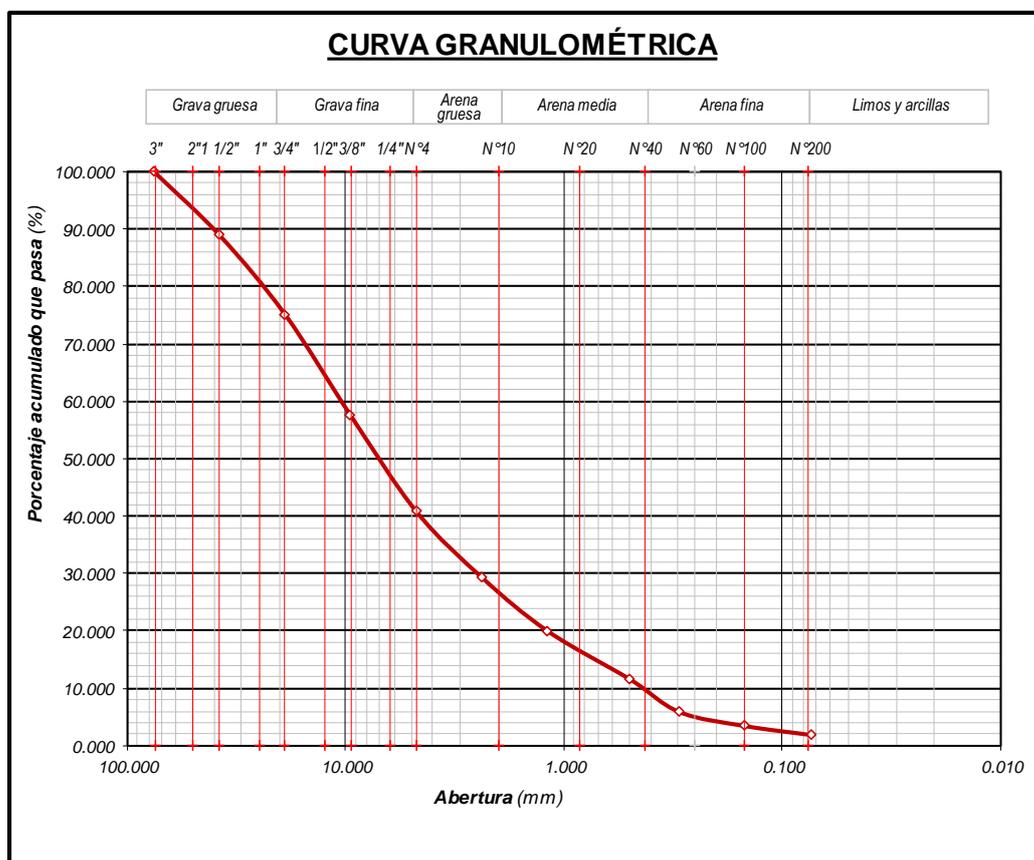
ANALISIS GRANUMETRICO POR TAMIZADO					
ASTM D-422					
REFERENCIAS DE LA MUESTRA					
Identificación:	Margen Derecho		Calicata:	C-01	
Presentación:	01 Bolsa de Polietileno		Profundidad:	0.00 - 1.50 m.	
Cantidad:	05 Kg. Aprox.		Progresiva:	E. 80	
Peso inicial seco (g.):	4,236.23	Peso lavado seco (g.):	4,189.55	RESUMEN DE DATOS	
Tamices	Abertura	Peso	% Parcial	% Acumulado	
ASTM	(mm.)	Retenido (g.)	Retenido	Retenido	Pasa
3"	76.200	0.000	0.000	0.000	100.000
1 1/2"	38.100	511.580	12.08	12.076	87.924
3/4"	19.050	692.430	16.35	28.422	71.578
3/8"	9.525	799.480	18.87	47.294	52.706
N° 4	4.760	595.790	14.06	61.358	38.642
N° 8	2.380	425.650	10.05	71.406	28.594
N° 16	1.190	370.860	8.75	80.161	19.839
N° 30	0.500	335.110	7.91	88.071	11.929
N° 50	0.297	296.410	7.00	95.068	4.932
N° 100	0.149	130.410	3.08	98.147	1.853
N° 200	0.074	31.830	0.75	98.898	1.102
>N° 200		0.000	0.00		
TOTAL		4,189.550	98.898		
				% pasa 3"	100.00
				% pasa N° 4	38.64
				% pasa N° 200	1.10
				L.L.	
				L.P.	
				I.P.	
				D10	0.459
				D30	2.759
				D50	8.716
				D60	13.559
				Cu	29.51
				Cc	1.22
				GRAVA (%)	61.358
				ARENA (%)	37.540
				FINOS (%)	1.102



ANALISIS GRANUMETRICO POR TAMIZADO					
ASTM D-422					
REFERENCIAS DE LA MUESTRA					
Identificación:	Margen Derecho		Calicata:	C-02	
Presentación:	01 Bolsa de Polietileno		Profundidad:	0.00 - 1.50 m.	
Cantidad:	05 Kg. Aprox.		Progresiva:	E. 100	
Peso inicial seco (g.):	3,967.53	Peso lavado seco (g.):	3,916.54		
Tamices	Abertura	Peso	% Parcial	% Acumulado	
ASTM	(mm.)	Retenido (g.)	Retenido	Retenido	Pasa
3"	76.200	0.000	0.000	0.000	100.000
1 1/2"	38.100	593.290	14.954	14.954	85.046
3/4"	19.050	498.040	12.553	27.507	72.493
3/8"	9.525	845.550	21.312	48.818	51.182
N° 4	4.760	512.410	12.915	61.733	38.267
N° 8	2.380	374.980	9.451	71.185	28.815
N° 16	1.190	396.680	9.998	81.183	18.817
N° 30	0.500	253.360	6.386	87.569	12.431
N° 50	0.297	234.870	5.920	93.488	6.512
N° 100	0.149	172.510	4.348	97.836	2.164
N° 200	0.074	34.850	0.878	98.715	1.285
>N° 200		0.000	0.000		
TOTAL		3,916.540	98.715		
RESUMEN DE DATOS					
% pasa 3"		100.00			
% pasa N° 4		38.27			
% pasa N° 200		1.29			
L.L.					
L.P.					
I.P.					
D10		0.432			
D30		2.718			
D50		9.142			
D60		13.874			
Cu		32.14			
Cc		1.23			
GRAVA (%)		61.733			
ARENA (%)		36.981			
FINOS (%)		1.285			



ANALISIS GRANUMETRICO POR TAMIZADO					
ASTM D-422					
REFERENCIAS DE LA MUESTRA					
Identificación:	Margen Izquierdo		Calicata:	C-04	
Presentación:	01 Bolsa de Polietileno		Profundidad:	0.00 - 1.50 m.	
Cantidad:	05 Kg. Aprox.		Progresiva:	E. 100	
Peso inicial seco (g.):	4,346.42	Peso lavado seco (g.):	4,263.89		
Tamices	Abertura	Peso	% Parcial	% Acumulado	
ASTM	(mm.)	Retenido (g.)	Retenido	Retenido	Pasa
3"	76.200	0.000	0.000	0.000	100.000
1 1/2"	38.100	481.350	11.075	11.075	88.925
3/4"	19.050	601.580	13.841	24.915	75.085
3/8"	9.525	765.610	17.615	42.530	57.470
N° 4	4.760	726.690	16.719	59.249	40.751
N° 8	2.380	499.520	11.493	70.742	29.258
N° 16	1.190	404.710	9.311	80.053	19.947
N° 30	0.500	363.790	8.370	88.423	11.577
N° 50	0.297	247.190	5.687	94.111	5.889
N° 100	0.149	105.240	2.421	96.532	3.468
N° 200	0.074	68.210	1.569	98.101	1.899
>N° 200		0.000	0.000		
TOTAL		4,263.890	98.101		
RESUMEN DE DATOS					
% pasa 3"	100.00				
% pasa N° 4	40.75				
% pasa N° 200	1.90				
L.L.					
L.P.					
I.P.					
D10	0.456				
D30	2.560				
D50	7.595				
D60	11.060				
Cu	24.25				
Cc	1.30				
GRAVA (%)	59.249				
ARENA (%)	38.852				
FINOS (%)	1.899				



ANEXO 6: Coeficiente de Rugosidad (n) de Manning

Cowan propone un método, según el cual el cálculo del coeficiente de rugosidad, puede estimarse mediante la siguiente relación:

$$n = m_5 \cdot (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \quad (8.1)$$

Los valores de estas variables se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8.1

Valores de Variables Según Condiciones del Canal, Método de Cowan.

Condiciones del Canal		Valores
Material Involucrado	Tierra	0.020
	Corte en roca	0.025
	Grava fina	0.024
	Grava gruesa	0.028
Grado de irregularidad	Suave	0.000
	Menor	0.005
	Moderado	0.010
	Severo	0.020
Variaciones de la sección transversal	Gradual	0.000
	Ocasionalmente alternante	0.005
	Frecuentemente alternante	0.010-0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	0.000
	Menor	0.010-0.015
	Apreciable	0.020-0.030
Vegetación	Severo	0.040-0.060
	Baja	0.005-0.010
	Media	0.010-0.025
	Alta	0.025-0.050
Grado de los efectos por meandro	Muy alta	0.050-0.100
	Menor	1.000
	Apreciable	1.500
	Severo	1.300

Fuente: Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje (pág. 95-96, 2008).

Dando como resultado los siguientes valores para el coeficiente de rugosidad:

- Margen derecho:

Tabla 8.2

Valores de Coeficientes Según Condiciones del Margen Derecho.

Condiciones del Canal		Valores	
Material Involucrado	Grava gruesa	n_0	0.028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0.000
Variaciones de la sección transversal	Ocasionalmente alternante	n_2	0.005
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n_3	0
Vegetación	Baja	n_4	0.007
Grado de los efectos por meandro	Menor	m_5	1

Obteniendo se cómo coeficiente de rugosidad de Manning:

$$n_{derecho} = 0.040$$

- Margen izquierdo:

Tabla 8.3

Valores de Coeficientes Según Condiciones del Margen Izquierdo.

Condiciones del Canal		Valores	
Material Involucrado	Grava gruesa	n_0	0.028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0.000
Variaciones de la sección transversal	Ocasionalmente alternante	n_2	0.005
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n_3	0
Vegetación	Baja	n_4	0.007
Grado de los efectos por meandro	Menor	m_5	1

Obteniendo se cómo coeficiente de rugosidad de Manning:

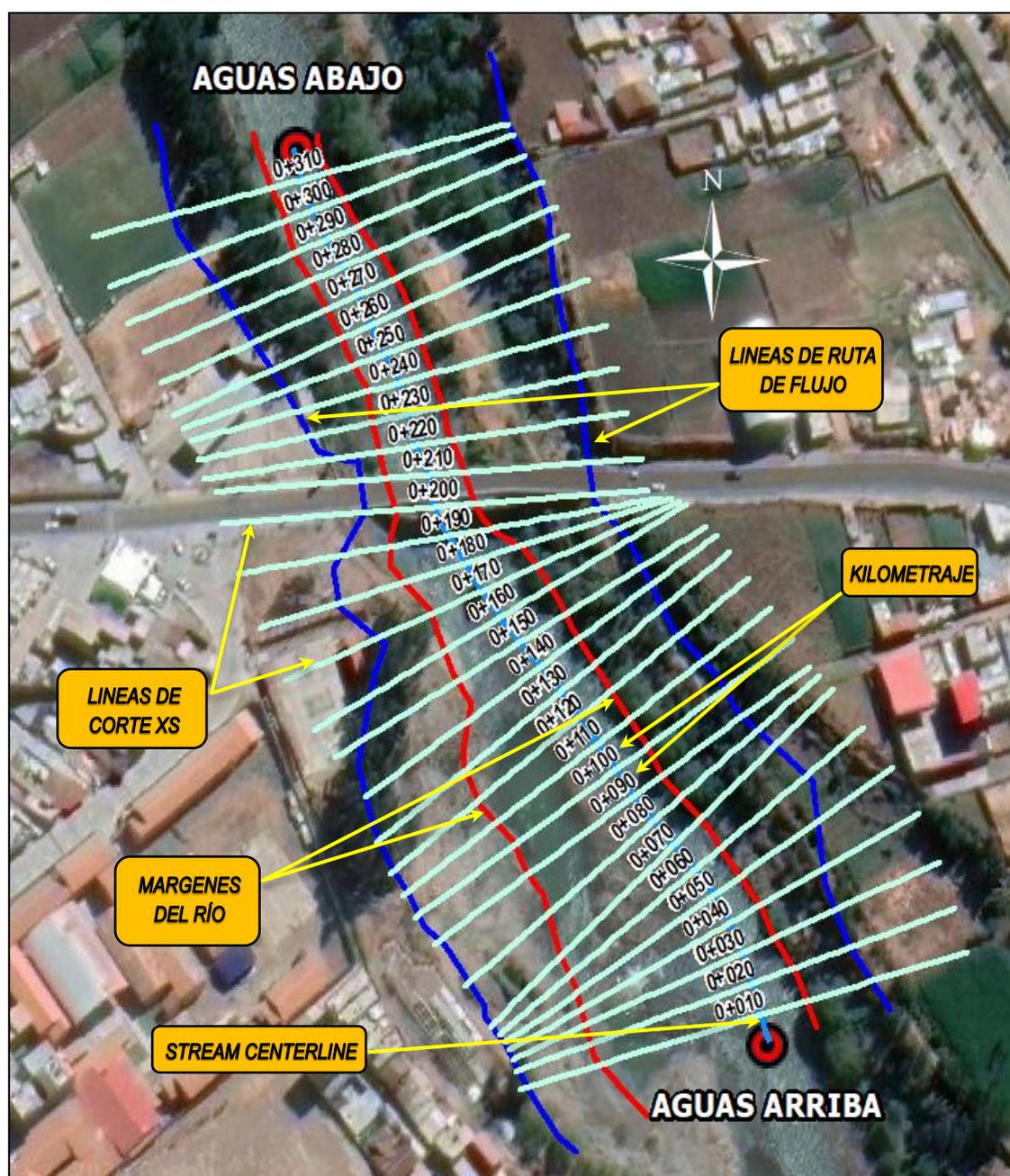
$$n_{izquierdo} = 0.040$$

ANEXO 7: Modelamiento Hidráulico del Tramo de Estudio

- Se definieron el eje central, márgenes visibles, dirección del flujo y las secciones transversales con separación de 10 metros y de longitud 140 metros del río Santa en el tramo de estudio mediante la extensión HECGeoRas.

Figura 8.1

Herramienta XS Cut Lines en el Tramo de Estudio.



ANEXO 8: Características Hidráulicas del Tramo de Estudio

Tabla 8.4

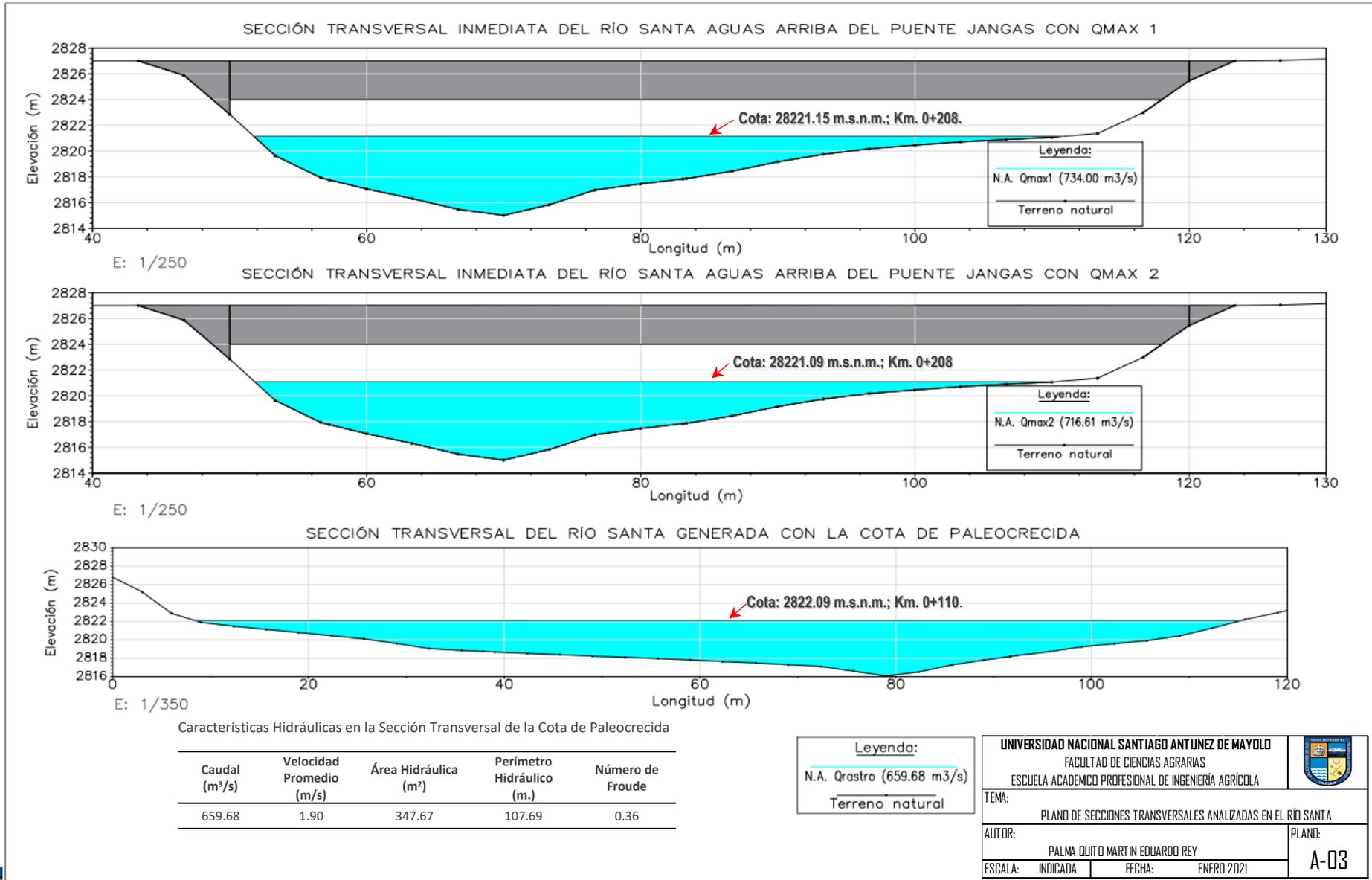
Características Hidráulicas del Tramo de Estudio.

Kilometraje	$Q_{máx_n}$ (m ³ /s)	Área Mojada (m ²)	Perímetro Mojado (m)	Vel. Promedio (m/s)	Prof. Media Hidráulica (m)	Número de Froude	Prof. Media al Estribo Izquierdo (m)	Número de Froude en Estribo
0+010	Q_{max_1} : 734.00	276.51	98.67	2.65	2.83	0.52	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	270.05	98.15	2.65	2.78	0.53	-	-
0+020	Q_{max_1} : 734.00	286.26	97.47	2.56	2.97	0.49	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	279.81	97.08	2.56	2.91	0.50	-	-
0+030	Q_{max_1} : 734.00	299.62	99.14	2.45	3.05	0.47	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	293.00	98.68	2.45	3.00	0.47	-	-
0+040	Q_{max_1} : 734.00	318.14	103.71	2.31	3.10	0.44	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	311.15	103.25	2.30	3.04	0.44	-	-
0+050	Q_{max_1} : 734.00	345.16	110.08	2.13	3.17	0.40	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	337.75	109.63	2.12	3.11	0.40	-	-
0+060	Q_{max_1} : 734.00	360.47	114.09	2.04	3.19	0.38	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	352.72	113.59	2.03	3.14	0.38	-	-
0+070	Q_{max_1} : 734.00	352.43	108.86	2.08	3.27	0.39	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	345.04	108.32	2.08	3.22	0.39	-	-
0+080	Q_{max_1} : 734.00	359.59	107.70	2.04	3.37	0.37	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	352.32	107.12	2.03	3.32	0.38	-	-
0+090	Q_{max_1} : 734.00	368.62	109.24	1.99	3.41	0.37	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	361.20	108.69	1.98	3.35	0.37	-	-
0+100	Q_{max_1} : 734.00	374.60	110.35	1.96	3.43	0.36	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	367.06	109.84	1.95	3.37	0.36	-	-
0+110	Q_{max_1} : 734.00	382.79	110.14	1.92	3.51	0.35	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	375.27	109.60	1.91	3.45	0.35	-	-
0+120	Q_{max_1} : 734.00	384.84	105.97	1.91	3.67	0.34	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	377.62	105.57	1.90	3.61	0.34	-	-
0+130	Q_{max_1} : 734.00	399.24	105.18	1.84	3.85	0.32	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	392.12	104.74	1.83	3.79	0.32	-	-
0+140	Q_{max_1} : 734.00	393.64	100.08	1.86	3.99	0.32	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	386.88	99.68	1.85	3.94	0.32	-	-

Kilometraje	$Q_{máx_n}$ (m ³ /s)	Área Mojada (m ²)	Perímetro Mojado (m)	Vel. Promedio (m/s)	Prof. Media Hidráulica (m)	Número de Froude	Prof. Media al Estribo Izquierdo (m)	Número de Froude en Estribo
0+150	Q_{max_1} : 734.00	362.55	90.05	2.02	4.10	0.34	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	356.58	89.70	2.01	4.04	0.34	-	-
0+160	Q_{max_1} : 734.00	305.95	74.92	2.40	4.18	0.40	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	301.22	74.52	2.38	4.14	0.40	-	-
0+170	Q_{max_1} : 734.00	264.33	63.17	2.78	4.34	0.45	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	260.58	62.85	2.75	4.30	0.45	-	-
0+180	Q_{max_1} : 734.00	291.14	69.63	2.52	4.31	0.41	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	286.91	69.29	2.50	4.27	0.41	-	-
0+190	Q_{max_1} : 734.00	255.55	66.85	2.87	3.96	0.49	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	251.62	66.46	2.85	3.92	0.49	-	-
0+200	Q_{max_1} : 734.00	168.14	61.37	4.37	2.83	0.92	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	164.83	60.66	4.35	2.81	0.92	-	-
0+208 (Aguas arriba)	Q_{max_1} : 734.00	166.76	61.07	4.40	2.82	0.93	2.02	0.60
	Q_{max_2} : 716.61	163.46	60.37	4.38	2.80	0.93	1.98	0.60
0+208 (Aguas abajo)	Q_{max_1} : 734.00	176.14	63.42	4.17	2.88	0.87	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	172.48	62.92	4.15	2.84	0.88	-	-
0+210	Q_{max_1} : 734.00	151.99	59.02	4.83	2.67	1.04	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	145.94	57.00	4.91	2.65	1.06	-	-
0+220	Q_{max_1} : 734.00	134.67	47.35	5.45	2.96	1.08	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	131.38	46.80	5.45	2.92	1.09	-	-
0+230	Q_{max_1} : 734.00	112.02	47.90	6.55	2.40	1.46	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	109.93	47.55	6.52	2.37	1.46	-	-
0+240	Q_{max_1} : 734.00	110.99	51.39	6.61	2.21	1.57	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	109.02	51.05	6.57	2.18	1.56	-	-
0+250	Q_{max_1} : 734.00	107.90	54.91	6.80	2.00	1.70	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	105.93	54.58	6.76	1.98	1.70	-	-
0+260	Q_{max_1} : 734.00	115.51	59.75	6.35	1.97	1.61	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	113.36	59.29	6.32	1.94	1.61	-	-
0+270	Q_{max_1} : 734.00	133.12	64.09	5.51	2.11	1.34	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	131.32	63.79	5.46	2.09	1.33	-	-
0+280	Q_{max_1} : 734.00	179.37	72.08	4.09	2.53	0.90	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	178.91	72.02	4.01	2.53	0.88	-	-

Kilometraje	$Q_{máx_n}$ (m ³ /s)	Área Mojada (m ²)	Perímetro Mojado (m)	Vel. Promedio (m/s)	Prof. Media Hidráulica (m)	Número de Froude	Prof. Media al Estribo Izquierdo (m)	Número de Froude en Estribo
0+290	Q_{max_1} : 734.00	185.50	75.97	3.96	2.48	0.88	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	185.03	75.91	3.87	2.48	0.86	-	-
0+300	Q_{max_1} : 734.00	184.64	76.50	3.98	2.45	0.88	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	185.09	76.54	3.87	2.46	0.86	-	-
0+310	Q_{max_1} : 734.00	175.94	74.74	4.17	2.39	0.95	-	-
	Q_{max_2} : 716.61	170.35	74.22	4.21	2.33	0.97	-	-

ANEXO 9: Plano de Secciones Transversales del Río Santa



ANEXO 10: Fotos de la Visita de Campo al Puente Jangas.

- Medición de geometría del estribo izquierdo.

Figura 8.1

Foto de Medición de Socavación en el Estribo Izquierdo.

**Figura 8.2**

Foto del estribo derecho.

