

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**“MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA DEFENSA DE CALANA  
CON EL FIN DE DETERMINAR LA VULNERABILIDAD  
ANTE MÁXIMAS AVENIDAS”**

**PARA OPTAR:**

**TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:**

Bach. Carlos Alberto Mayta Rojas

Bach. Efrain Roger Mamani Maquera

TACNA – PERÚ

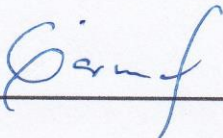
2018

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**


**Tesis**

**“MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA DEFENSA DE CALANA  
CON EL FIN DE DETERMINAR LA VULNERABILIDAD  
ANTE MÁXIMAS AVENIDAS”**


Tesis sustentada y aprobada el 13 de Abril del 2018; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE:  \_\_\_\_\_

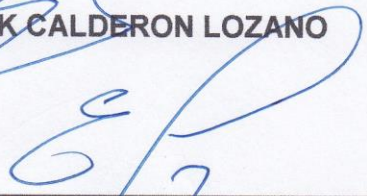
Ing. FERMÍN GÁRNICA TELLO

SECRETARIO:  \_\_\_\_\_

ING. ROLANDO GONZALO SALAZAR CALDERÓN JUÁREZ

VOCAL:  \_\_\_\_\_

ING. ERICK CALDERON LOZANO

ASESOR:  \_\_\_\_\_

PhD. EDWIN MARTIN PINO VARGAS

## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo CARLOS ALBERTO MAYTA ROJAS y EFRAIN ROGER MAMANI MAQUERA, en calidad de: BACHILLERES de la Escuela Profesional de INGENIERÍA CIVIL de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificados con DNI N°00463746 y N°44826620

Declaro bajo juramento que:

1. Somos los autores de la tesis:

“MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA DEFENSA DE CALANA CON EL FIN DE DETERMINAR LA VULNERABILIDAD ANTE MÁXIMAS AVENIDAS”

la misma que presentamos para optar el título de INGENIERO CIVIL

2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.

3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.

4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.

5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

Por lo expuesto, mediante la presente asumimos frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. En consecuencia, nos hacemos responsables frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones,

reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro y/o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Tacna, abril del 2018



CARLOS A. MAYTA ROJAS

DNI N° 00463746



EFRAIN R. MAQUERA MAMANI

DNI N° 44826620

**DEDICATORIA**

A nuestras familias por el apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTO**

A nuestro asesor de tesis Ph.D. Edwin Pino Vargas.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiii</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>2</b>
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	2
1.4. OBJETIVOS .....	3
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.4.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	3
1.5. HIPÓTESIS .....	3
1.5.1. HIPÓTESIS GENERAL .....	3
1.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA .....	3
<b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO .....	4
2.2. BASES TEÓRICAS.....	6
2.2.1. ASPECTOS GENERALES .....	6
2.2.2. CLASIFICACIÓN DE FLUJOS.....	7
2.2.2.1. FLUJO PERMANENTE Y NO PERMANENTE .....	7
2.2.2.2. FLUJO UNIFORME Y VARIADO.....	8
2.2.2.3. FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO .....	8
2.2.2.4. FLUJO CRÍTICO, SUBCRÍTICO Y SUPERCRÍTICO.....	8
2.2.2.5. FLUJO UNIDIMENSIONAL, FLUJO BIDIMENSIONAL, FLUJO TRIDIMENSIONAL.....	9
2.2.3. ECUACIÓN DE LA ENERGÍA.....	9
2.2.4. ECUACIÓN DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO .....	11
2.2.5. PRESIÓN HIDROSTÁTICA.....	11
2.2.6. PESO DE VOLUMEN DE CONTROL.....	12
2.2.7. FRICCIÓN SOBRE EL CONTORNO.....	13
2.2.8. PENDIENTE MOTRIZ. ECUACIÓN DE MANNING .....	14
2.2.9. COEFICIENTE DE RUGOSIDAD.....	15
2.2.9.1. FACTORES QUE AFECTAN AL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD... 15	
2.2.9.2. TABLA DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING.....	15
2.2.9.3. SECCIONES CON RUGOSIDAD COMPUESTA .....	16
2.2.10. PÉRDIDAS DE CARGA POR EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN. ....	19

2.2.11.	MODELACIÓN HIDRÁULICA .....	20
2.2.11.1.	MODELOS UNIDIMENSIONALES.....	20
2.2.11.2.	MODELOS BIDIMENSIONALES.....	21
2.2.11.3.	MODELO HIDRÁULICO EN HEC RAS .....	22
2.2.12.	PERIODOS DE RETORNO Y RIESGO EN OBRAS.....	26
2.3.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	28
<b>CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>32</b>	
3.1.	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	32
3.2.	POBLACIÓN Y/O MUESTRA DE ESTUDIO .....	32
3.2.1.	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	32
3.3.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	34
3.3.1.	MATRIZ DE VARIABLES.....	34
3.3.2.	CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	34
3.3.2.1.	CLIMATOLOGÍA.....	34
3.3.2.2.	GEOLOGÍA .....	35
3.3.2.2.1.	ESTRATIGRAFÍA.....	35
3.3.2.2.2.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	42
3.3.2.3.	GEOMORFOLOGÍA.....	43
3.3.2.4.	HIDROLOGÍA .....	44
3.4.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS.....	47
3.4.1.	ASPECTOS GENERALES .....	47
3.4.3.	CONDICIONES DEL CAUCE .....	48
3.4.4.	ELECCIÓN DE MODELOS UNIDIMENSIONALES.....	49
3.4.5.	CARACTERÍSTICAS DEL MODELO .....	49
3.4.6.	MATERIALES Y/O INSTRUMENTOS .....	50
3.5.	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS .....	51
<b>CAPITULO IV: RESULTADOS .....</b>	<b>53</b>	
4.1.	CARACTERÍSTICAS DEL MODELAMIENTO.....	53
4.1.1.	DATOS GEOMÉTRICOS.....	53
4.1.2.	DATOS HIDRÁULICOS Y CONDICIONES DE CONTORNO .....	58
4.2.	ELABORACIÓN DE LA MODELACIÓN .....	59
4.3.	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN.....	60
4.3.1.	EJE DEL CAUCE DE LA DEFENSA CALANA.....	61
4.3.2.	SECCIONES TRANSVERSALES .....	62
4.3.3.	PERFIL LONGITUDINAL.....	64
4.3.4.	VISTA TRIDIMENSIONAL.....	65



<b>CAPITULO V: DISCUSIÓN .....</b>	<b>66</b>
5.1. PRIMER ESCENARIO $Tr= 25$ años-CAUDAL $39 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	66
5.2. SEGUNDO ESCENARIO $Tr= 50$ años-CAUDAL $61 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	67
5.3. TERCER ESCENARIO $Tr= 100$ años-CAUDAL $94 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	68
5.4. CUARTO ESCENARIO $Tr= 200$ años-CAUDAL $147 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	70
5.5. VERIFICACIÓN DEL MODELO .....	70
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>74</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>76</b>
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores del coeficiente de rugosidad n.....	17
Tabla 2 Valores de período de retorno T (años) .....	27
Tabla 3 Valores máximos recomendados de riesgo admisible de obras de drenaje	28
Tabla 4 Ubicación geográfica zona de estudio.....	33
Tabla 5 Matriz de Variables .....	34
Tabla 6 Cálculo de caudal instantáneo total de las cuencas Caplina-Palca-Vilavilani .....	46
Tabla 7 Valores de n usados para estimar la Rugosidad Compuesta .....	58
Tabla 8 Valores para coeficiente contracción y expansión en flujo supercrítico .....	59
Tabla 9 Valores para coeficiente contracción y expansión en flujo subcrítico .....	59
Tabla 10 Velocidades según modelación hidráulica en la defensa Calana para cada periodo de retorno estudiado .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Energía entre secciones 1 y 2.....	10
<i>Figura 2.</i> Riesgo de por lo Menos una Excedencia del Evento de Diseño Durante la Vida Útil .....	27
<i>Figura 3.</i> Ubicación de la zona de estudio .....	33
<i>Figura 4.</i> Vista satelital de la defensa Calana con el eje de cauce.....	53
<i>Figura 5.</i> Material de fondo de cauce en la defensa de Calana.....	54
<i>Figura 6.</i> Dique Enrocado de la defensa de Calana progresiva Km 0+540 .....	54
<i>Figura 7.</i> Inicio de sección de muros de concreto en la defensa de Calana.....	55
<i>Figura 8.</i> Inicio de sección compuesta en la defensa de Calana.....	55
<i>Figura 9.</i> Sección compuesta de la defensa de Calana .....	56
<i>Figura 10.</i> Vista del puente de la carretera Pachia-Calana .....	57
<i>Figura 11.</i> Gaviones aguas abajo del puente de la carretera Pachia-Calana .....	57
<i>Figura 12.</i> Vista del modelo del eje de cauce en HEC RAS .....	61
<i>Figura 13.</i> Sección transversal para los periodos de retorno 25, 50, 100 y 200 años en la progresiva Km 1+130 (puente Calana-Pachía).....	62
<i>Figura 14.</i> Sección transversal para los periodos de retorno 25, 50,100 y 200 años en la progresiva Km 1+120 .....	62
<i>Figura 15.</i> Características hidráulicas del flujo a T=25 años .....	63
<i>Figura 16.</i> Características hidráulicas del flujo a T=50 años .....	63
<i>Figura 17.</i> Características hidráulicas del flujo a T=100 años .....	64
<i>Figura 18.</i> Características hidráulicas del flujo a T=200 años .....	64
<i>Figura 19.</i> Perfil Longitudinal de la defensa de Calana .....	65
<i>Figura 20.</i> Perspectiva tridimensional de la defensa de Calana .....	65
<i>Figura 21.</i> Vista 3D con caudal de 39 m <sup>3</sup> /s.....	66
<i>Figura 22.</i> Vista 3D con caudal de 61 m <sup>3</sup> /s.....	67
<i>Figura 23.</i> Vista 3D con caudal de 94 m <sup>3</sup> /s.....	68
<i>Figura 24.</i> Sección hidráulica en la progresiva Km 0+900 .....	69
<i>Figura 25.</i> Vista 3D con caudal de 147 m <sup>3</sup> /s.....	70
<i>Figura 26.</i> Publicación digital de avenida extrema en el río Caplina .....	71
<i>Figura 27.</i> Río Caplina-río Seco en puente Calana-Pachía.....	71
<i>Figura 28.</i> Sección hidráulica para un caudal de 35 m <sup>3</sup> /s .....	72
<i>Figura 29.</i> Sección aguas abajo del puente carretera Calana-Pachia.....	72
<i>Figura 30.</i> Río Caplina-río Seco antes de la zona de Sobraya.....	73

## RESUMEN

La defensa de Calana es una estructura de encauzamiento, que deriva las aguas en exceso provenientes de lluvias en las nacientes de la cuenca del río Caplina hasta la quebrada Arunta en el departamento de Tacna. Esta estructura recibe con una variabilidad interanual y, en los periodos de verano, caudales variables, reportándose hasta la fecha, caudales máximos de 35 m<sup>3</sup>/s en el año 2012. La defensa de Calana es una estructura importante por encontrarse en la cabecera del Valle de Tacna, está construida de paredes de mampostería y concreto, tiene secciones relativamente uniformes hasta llegar al puente de la carretera Calana – Pachía, donde su sección sufre un estrechamiento abrupto.

El colapso de la estructura generaría inundaciones en las zonas colindantes, pérdidas de cultivos, daños en infraestructuras, incluso, pérdidas de vidas humanas. La simulación numérica es una herramienta importante que permite analizar y simular el comportamiento hidráulico de un río y en base a ello evaluar las condiciones de vulnerabilidad. En el presente trabajo se aplicó el modelo HEC-RAS versión 5.0.3 para simular el flujo en el cauce de la defensa de Calana para determinar el nivel de agua y zonas propensas a inundaciones.

La simulación permitió identificar el caudal máximo que puede soportar la estructura e identificó lugares específicos en el trayecto de la defensa donde el tirante de agua supera su corona, siendo estas zonas expuestas a inundaciones. Las velocidades de flujo son altamente erosivas para la estructura, no mayores de 8.03 m/s. El presente trabajo muestra la aplicabilidad del modelo matemático HEC RAS para evaluar la vulnerabilidad de la defensa de Calana.

**Palabras clave:** Modelación hidráulica, HEC RAS, vulnerabilidad.

## ABSTRACT

The defense of Calana is a structure of rivers derivation, which derives excess water from rains in the headwaters of the Caplina river basin to the Arunta ravine in the department of Tacna. This structure receives with an interannual changeability and, in the summer periods, variable wealths, being brought up to the date, maximum wealths of 35 m<sup>3</sup>/s in the year 2012.

The defense of Calana is an important structure for being in the head of the Vale of Tacna, she is constructed of masonry walls and I limit, it has relatively uniform sections up to coming to the bridge of the vehicular Calana – Pachía, where its section suffers an abrupt tightening. The collapse of the structure would generate floods in the adjacent areas, losses of cultivation, damages in infrastructures, even, losses of human lives. The numerical simulation is an important tool that allows analyzing and simulating the hydraulic behavior of a river and based on it evaluate the conditions of vulnerability. In the present work the model HEC-RAS applied version 5.0.3 to himself to simulate the flow in the river bed of the defense of Calana to determine the water level and areas inclined to floods.

The simulation allowed to identify the maximum wealth that can support the structure and identified specific places in the trajectory of the defense where the water brace overcomes its crown, being these areas exposed to floods. The flow speeds are highly abrade for the structure, not major than 8.03 m/s. The present work shows the applicability of the mathematical model HEC RAS to evaluate the vulnerability of the defense of Calana.

**Key words: Hydraulic modeling, HEC RAS, vulnerability**

## INTRODUCCIÓN

En el periodo de verano, entre los meses de diciembre a marzo, la parte alta de las cuencas hidrográficas de la región de Tacna tiene un incremento considerable en sus precipitaciones, lo que conlleva a que sus ríos tengan incrementos considerables en su caudal durante esa temporada.

La cuenca del río Caplina nace en la cordillera El Barroso, recorriendo su cauce natural hasta la bocatoma denominado Bajo Caplina o challata, donde el agua es captada por el canal de mampostería del mismo nombre para uso agrícola y poblacional. En épocas de lluvia el exceso de caudal es derivado hacia el encauzamiento Caplina-Arunta por su cauce natural y conducido hacia el río Seco recorriendo el distrito de Calana, Pocollay, Tacna y para posteriormente recorrer las pampas de Hospicio y finalmente desembocar en el mar.

El encauzamiento hacia la quebrada Arunta se hace mediante un dique longitudinal llamado Defensa Calana, con secciones de enrocado, muros de piedra emboquillada y secciones en concreto armado hasta llegar al puente de la carretera Calana-Pachía, donde su sección es estrechada drásticamente formando un “embudo” que en época avenidas extremas pone en peligro a la población e infraestructura de contención.

Los daños causados por eventos extremos de precipitaciones deben ser prevenidos. Aquí toma importancia el desarrollo de un modelamiento hidráulico, pues este permite predecir el comportamiento de los fenómenos naturales. El presente trabajo pretende dar a conocer la vulnerabilidad de la defensa de Calana con el uso del modelo hidráulico en HEC-RAS versión 5.0.3 frente a condiciones de avenidas extremas, permitiendo conocer las zonas más críticas que pueden originar áreas inundables que ponen en riesgo a la población, infraestructura, y ocasionan pérdidas de terrenos de cultivos, etc. Los resultados del presente trabajo permitirán, a las autoridades correspondientes, implementar medidas de prevención y mitigación.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Es notable la complejidad geomorfológica e hidrológica de las corrientes fluviales que drenan los relieves del sistema hídrico de la cuenca Caplina (Pino, 2013). Las aguas del río Caplina son captadas en la bocatoma Challata y conducidas por el canal Bajo Caplina; pero, en épocas de lluvias, existe un incremento de los caudales originando que las aguas sean encauzadas por su cauce natural hasta llegar al encauzamiento Caplina-Arunta, pasando por los distritos de Calana, Pocollay, Tacna y pampas Hospicio y luego desfogando en el Océano Pacífico.

Este encauzamiento está ubicado en la carretera Calana-Pachia y, desviando el río hacia el margen izquierdo mediante diques longitudinales. Este dique es llamado Defensa Calana, conformando una sección compuesta (base de 8.00 m) hasta el puente ubicado en la carretera hacia el distrito de Pachía donde existe un estrechamiento de la sección (base de 5.00 m). Esto ocasiona que, en periodos de lluvia, los grandes caudales provenientes de la parte alta de la cuenca generan una alta vulnerabilidad de la estructura y de las poblaciones en asentamientos y urbanizaciones.

### 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo las máximas avenidas generan riesgo y cómo un modelo hidráulico permite determinar la vulnerabilidad de la defensa de Calana?

### 1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Debido a que las precipitaciones en los periodos de diciembre a marzo en la cabecera de la cuenca Caplina generan aumentos de caudales considerables en su cauce, estos originan la colmatación y la probable falla de la defensa de Calana, haciendo vulnerable tanto a la infraestructura como a las zonas aledañas por peligro de inundación. En este sentido, la investigación se justifica por los siguientes puntos:

La investigación resulta importante, porque los resultados del modelamiento hidráulico proporcionarán conocimientos hasta que caudal de máximas avenidas puede soportar la defensa de Calana sin ocasionar su falla ni riesgo de inundaciones.

La investigación puede probar que la modelación hidráulica es una herramienta actual y necesaria para poder realizar análisis del comportamiento hidráulico del río. Y que con el empleo de estos modelos realizar prevención ante riesgo de inundación siendo una herramienta para la toma de decisiones en materia de implementar criterios para la construcción de obras hidráulicas y de ordenamiento territorial.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la vulnerabilidad de la defensa de Calana mediante modelación hidráulica.

### **1.4.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS**

- Conocer que caudal máximo generaría la falla hidráulica de la estructura existente.
- Realizar la modelación hidráulica con el software HEC-RAS.
- Identificar las zonas críticas de desborde debido a caudales extraordinarios que pueden originar inundaciones en los tramos de la defensa Calana.

## **1.5. HIPÓTESIS**

### **1.5.1. HIPÓTESIS GENERAL**

Es posible evaluar la vulnerabilidad de la defensa de Calana mediante modelación hidráulica.

### **1.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA**

- El análisis del marco teórico, información histórica y trabajo de campo permite identificar el caudal que genera la falla hidráulica.
- El modelamiento hidráulico permite estudiar la vulnerabilidad de la Defensa Calana ante máximas avenidas.
- El modelamiento hidráulico permite identificar las zonas colindantes a la Defensa Calana propensas a inundación.



## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

Es importante realizar un modelamiento geoespacial para lograr identificar zonas críticas que sean vulnerables a múltiples peligros en la cuenca Camaná-Majes-Colca en Arequipa (Calderón, 2017). La solución se basa en establecer una metodología para la generación de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas (Alcocer, Rodríguez, Bourguett, Llaguno y Albornoz, 2016).

Vilcanqui (2016) desarrolló la modelación hidrológica con fines de gestión de riberas en la cuenca del río Caplina, caracterizando el estado de la cuenca hidrográfica en la bocatoma Calientes; asimismo, analizó y comparó los caudales promedios mensuales de las afluentes de la bocatoma Calientes mediante la modelación hidrológica.

Quispe y Sullca (2015) aplicaron el modelo HEC RAS en el río Ramis para el cálculo de su perfil hidráulico, logrando determinar el comportamiento del perfil hidráulico de un tramo del río Ramis utilizando diferentes periodos de retorno en el modelo con el fin de analizar llanuras de inundación.

Frisancho (2015) efectuó un análisis de vulnerabilidad mediante el modelamiento hidrodinámico del cauce del río Seco en la zona del cono sur de la ciudad de Tacna, donde logró identificar, mediante modelamiento hidrodinámico, las zonas vulnerables por inundación o desborde ante descargas máximas y determinó el ancho de la faja marginal.

LLuén (2015) analizó la capacidad de procesamiento del HEC RAS versión 5.0 para procesar modelos 1D y 2D, dando a conocer tanto sus ventajas como sus limitaciones al momento de realizar una simulación hidráulica.

Moya, Kure, Udo y Mano (2016) utilizaron la simulación numérica 2D con HEC RAS versión 5.0 para analizar y modelar la inundación de febrero del 2014 en la Amazonía boliviana “Llanos de Moxos”, mostrando la aplicabilidad y los posibles beneficios de HEC RAS para el estudio de inundaciones.

Díaz et al. (2015) modelaron con HEC-RAS un tramo del río Tercero en las localidades de Bell Ville y Villa María (Argentina), llegando a elaborar un mapa de inundaciones determinando las cotas y sectores donde se deben realizar obras de contención.

Velasquez (2015) efectuó el modelamiento hidrológico e hidráulico del río Santa en Ancash con HEC-RAS para la obtención de un mapa de inundaciones en el tramo del asentamiento humano las Flores. Mamani (2014) hizo un modelamiento de máximas avenidas que generan riesgo de inundaciones en la ciudad de Ayaviri-Puno, que buscó determinar zonas de riesgo de inundación por máximas avenidas.

Guarniz (2014) comparó los modelos unidimensionales (HEC RAS) y bidimensionales (IBER) en el análisis de roturas en presas de materiales sueltos; y aplicación a la presa Palo Redondo. Bardales y Concepción (2014) aplicaron el modelamiento hidrológico e hidráulico al cálculo de socavación en puentes en la carretera Chota-Bambamarca-Hualgayoc, donde se modeló el nivel de superficie de agua producida por descargas máximas.

Pino (2013) realizó la caracterización hidrogeomorfológica de la cuenca del río Caplina, con incidencia en el estudio de las crecidas fluviales y su aplicación a la gestión de riberas, logrando contextualizar la cuenca hidrográfica y analizar las interrelaciones entre la geomorfología e hidrología fluvial.

Cuervo (2012) comparó los modelos hidráulicos unidimensionales (HEC RAS) y bidimensionales (IBER) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos. INGEMMET (2009) realizó el estudio de investigación y evaluación hidrogeológica en la cuenca del río Caplina.

Mintegui, Robrero, Huelin y Gonzalo (2010) aplicaron HEC-RAS para comprobar el comportamiento de las obras de contención realizadas en el tramo final del arroyo del Partido en la provincia de Huelva, España, ante las avenidas ocurridas en el arroyo del Partido en los años 2009 y 2010.

Bladé (2005) realizó la modelación de flujo en lámina libre sobre cauces naturales en esquemas de volúmenes finitos en una y dos dimensiones, desarrollado en Barcelona-España. INRENA (2002) realizó el estudio hidrológico evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Caplina y

Uchusuma, determinó la disponibilidad hídrica de las cuencas de los ríos Caplina y Uchusuma, buscando mejorar la gestión de los recursos hídricos. Díez (2004) caracterizó, interpretó y modeló geomorfológica e hidrológicamente la cuenca hidrográfica del río Alberche en España.

## **2.2. BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1. ASPECTOS GENERALES**

El Perú, por su ubicación geográfica, aunada a las características geológicas naturales y frente a la variabilidad climática, es considerado, según el Tyndall Center de Inglaterra como el tercer país más vulnerable del mundo, después de Honduras y Bangladesh. Los fenómenos hidrometeorológicos (sequías, fuertes lluvias, inundaciones, heladas, granizadas, etc.) se han incrementado más de seis veces desde 1997 al 2006. Los eventos climáticos extremos como huaicos, inundaciones, heladas y el fenómeno de El Niño se están produciendo con mayor frecuencia e intensidad. Estos eventos ponen en evidencia el incremento del riesgo de la población y sus actividades; por ende, su influencia en la economía del país y en la vida de cada uno de sus pobladores (Calderón, 2017).

La variabilidad climática es entendida como intrínseca al clima y comprende variaciones en el estado medio del clima en todas las escalas temporales y espaciales comprendiendo eventos meteorológicos extremos que ocurren con cierta periodicidad como las sequías prolongadas, devastadores eventos lluviosos, años extraordinariamente cálidos, inundaciones y condiciones que resultan de eventos periódicos El Niño y La Niña, entre otros (Torres y Gómez, 2008)

El conocimiento de las magnitudes y frecuencias de caudales, en cualquier obra hidráulica existente o por diseñar, cobra importancia, ya que dicha obra debe tener la capacidad de conducir su caudal de diseño sin que llegue a colapsar ni fallar. También se debe tener en cuenta que cualquier obra hidráulica ya construida está expuesta a manifestaciones extraordinarias de caudal que pueden llegar a un nivel que sobrepasa la capacidad de contención de la misma.

Es necesario, aparte de evaluar obras que existen en el cauce de un río, conocer las particularidades del cauce como: puntos o zonas críticas de desborde,

áreas inundables, épocas en que el río incrementa su caudal, frecuencia de inundación, marcas o evidencias de niveles de agua dejadas por avenidas anteriores, tipo de material que acarrea la corriente, zonas o puntos críticos donde observamos presencia de erosión y sedimentación, y otro tipo de información que sean necesarias para el diseño, esa información la podemos conocer mediante consultas a pobladores con más años de antigüedad en el lugar del proyecto (Bardales y Concepción, 2014).

Las variaciones estacionales o por épocas que tienen las lluvias de una cuenca son el factor principal que origina la variabilidad de su escurrimiento tanto en el volumen mensual como en la magnitud de sus crecientes (Campos, 2017). Dichas variaciones de precipitaciones provocan el incremento de los caudales y el riesgo de falla de las obras hidráulicas, provocando inundaciones en zonas pobladas y la destrucción de la infraestructura existente. Las inundaciones traen problemas de todo tipo en diferentes áreas de la actividad humana (Frisancho, 2015).

La modelación hidráulica es una herramienta moderna para analizar el comportamiento de un flujo de agua en los ríos, cuyos resultados a diferentes periodos de retorno permiten conocer los perfiles de nivel de agua y conocer las posibles zonas de inundación teniendo en cuenta su topografía.

## **2.2.2. CLASIFICACIÓN DE FLUJOS**

El flujo se define como el movimiento de un fluido y su clasificación puede hacerse siguiendo diversos criterios.

### **2.2.2.1. FLUJO PERMANENTE Y NO PERMANENTE**

Si, en el flujo los parámetros (tirante, velocidad, área, etc.) no varían con respecto al tiempo, será flujo permanente y, si hay variación, será flujo no permanente Villón (2007). Matemáticamente, se pueden expresar:

Para flujo permanente:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = 0; \frac{\partial v}{\partial t} = 0; \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

Para flujo no permanente:

$$\frac{\partial y}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial v}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial A}{\partial t} \neq 0$$

#### **2.2.2.2. FLUJO UNIFORME Y VARIADO**

El flujo es uniforme cuando las características hidráulicas (presión, velocidad, área, etc.) son las mismas en un tramo de tubería o canal para cualquier sección de dicho tramo (Rocha, 2007).

El flujo gradualmente variado se define como aquel en donde los parámetros hidráulicos varían en forma gradual a lo largo de un canal. El flujo rápidamente variado se define como aquel en donde los parámetros cambian instantáneamente en distancias muy pequeñas (Villón, 2007).

#### **2.2.2.3. FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO**

El flujo laminar y turbulento, está relacionado con la viscosidad del fluido. Cuando el movimiento de las partículas sigue trayectoria separadas perfectamente definidas, no necesariamente paralelas, es un flujo laminar. Y será turbulento si las partículas se mueven sin tener un orden establecido, con trayectorias erráticas (Sotelo, 1997).

#### **2.2.2.4. FLUJO CRÍTICO, SUBCRÍTICO Y SUPERCRÍTICO**

Considera el efecto de la gravedad sobre el estado de flujo. Esta relación está dada por el número de Froude (F). Cuando  $F=1$ ;  $V = \sqrt{gD}$ , se dice que el flujo está en estado crítico. Cuando  $F<1$ ;  $V < \sqrt{gD}$ , el flujo es subcrítico. Si  $F>1$ ;  $V > \sqrt{gD}$ , el flujo es supercrítico; en este caso, la velocidad es alta y el flujo rápido (Chow, 1994).

### 2.2.2.5. FLUJO UNIDIMENSIONAL, BIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL

El flujo unidimensional establece las condiciones en una sección transversal, se establecen en término de valores promedios de sus propiedades (velocidad, densidad, presión, etc.). El flujo unidimensional se utiliza para analizar la mayoría de problemas por su sencillez (Quispe y Sullca, 2015).

En el flujo bidimensional, las partículas circulan en planos paralelos, se utilizan redes de flujo.

En el flujo es tridimensional, las características del flujo varían en el espacio, o sea, que las gradientes del flujo se dan en las tres direcciones. Siendo este tipo de flujo, es el más general (Sotelo, 1997).

### 2.2.3. ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

En cualquier línea de corriente que atraviesa una sección de un canal, se define como la energía total a la suma de la energía de posición, más la de presión y más de la velocidad (Villón, 2007).

Cuando la energía se expresa por unidad de peso, se obtiene la ecuación de Bernoulli o también llamado trinomio de Bernoulli, siendo esta la ecuación básica que estima la posición de la superficie libre del agua en el régimen permanente; matemáticamente se expresa:

$$E = z + y + \alpha \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

E= altura total de energía.

z= altura de posición.

y= tirante.

$\alpha$ =coeficiente de coriolis.

v=velocidad media

g=gravedad

Para el flujo libre, el coeficiente de coriolis puede variar entre 1.1 y 2.0, pudiéndose considerar 1.00 en la mayoría de los cálculos, lo que no conlleva a serios errores por cuanto la carga de velocidad supone un porcentaje pequeño en la energía total (Quispe y Sullca, 2015).

En flujos reales de una sección de un canal o río, existe una distribución no uniforme de velocidades, es decir, cada altura de velocidad será diferente. Solo en un flujo paralelo ideal con distribución uniforme de velocidades la altura de la velocidad puede ser idéntica o igual para todas las secciones transversales. Para casos prácticos, en flujos gradualmente variados, pueden suponerse que las alturas de las velocidades son iguales para todas las secciones del canal y podemos utilizar el coeficiente de energía para corregir los efectos de la distribución no uniforme de las velocidades (Chow, 1994).

Para el balance de energías entre una sección 1 aguas arriba de una sección 2, se considera matemáticamente:

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H$$

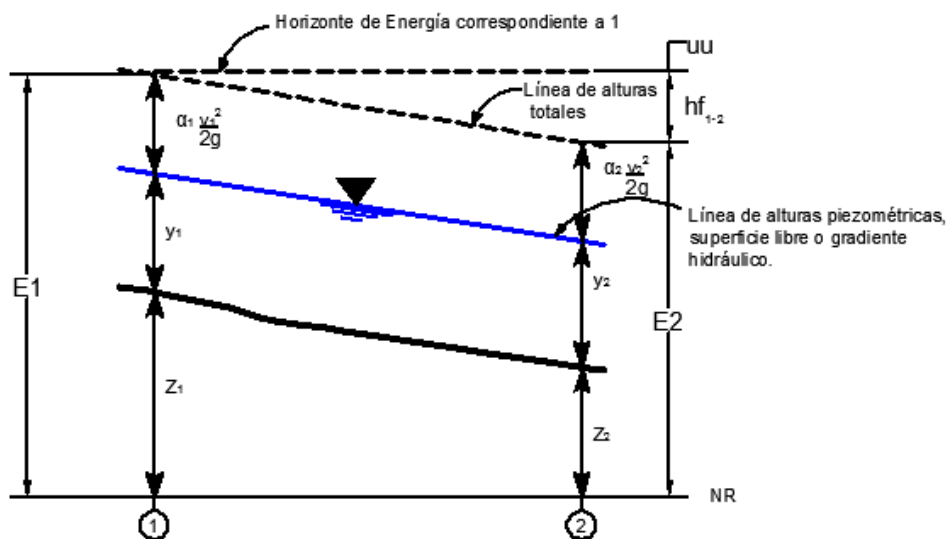


Figura 1. Energía entre secciones 1 y 2

Fuente: Villón (2007). Hidráulica de canales

Donde:

$hf_{1-2}$ : es la disipación de la energía entre las secciones 1 y 2

#### 2.2.4. ECUACIÓN DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO

La ecuación de la cantidad de movimiento se deriva de la segunda Ley de Newton para un cuerpo libre o volumen de control. Se entiende como la cantidad de movimiento de un elemento por su velocidad (Sotelo, 1997). La ecuación de la energía no es aplicable para el caso de un flujo que este en el régimen crítico, el flujo deja de ser gradualmente variado y transita a un régimen rápidamente variado. Dichos casos, se presentan en cambios de pendientes o en cambios bruscos de secciones provocados por la presencia de puentes. En estos casos, se usa la ecuación de cantidad de movimiento (Bladé et al., 2009). Y se expresa matemáticamente para dos secciones 1 y 2:

$$P_{2x} - P_{1x} + W_x - F_f = \rho Q(\beta_2 v_2 - \beta_1 v_1)$$

Donde:

$P_{2x} - P_{1x}$  = son componentes de dirección de movimiento de la resultante de la distribución de presiones hidrostáticas en las secciones 1 y 2.

$W_x$  = es la componente de peso del Volumen de control en la dirección del movimiento.

$F_f$  = es la fricción del flujo.

$\rho$  = es la densidad del agua.

$Q$  = caudal

$\beta_1, \beta_2$  = coeficientes de Boussineq, para canales prismáticos se tiene

$$1.01 < \beta < 1.12$$

$v_1, v_2$  = velocidades

#### 2.2.5. PRESIÓN HIDROSTÁTICA

La resultante de la presión hidrostática sobre cada sección en la dirección del movimiento se puede expresar matemáticamente (Bladé et al., 2009):

$$P_{ix} = \gamma * A_i * \bar{Y}_i * \cos\theta \quad i = 1,2$$



Donde:

$A_i$  Es el área mojada de las secciones 1 y 2.

$Y_i$  Corresponde a la profundidad, que se mide desde la superficie libre del agua, del centro de gravedad de la sección 1 y 2.

$\gamma$  Corresponde al peso específico del agua.

$\theta$  Es el ángulo del canal con la horizontal.

La hipótesis de distribución hidrostática de presiones es solo válida para pendientes inferiores a 1v:10h, que corresponde a ángulos de  $6^\circ$  y que en dicho caso da valores de  $\cos\theta \approx 1$ . De esta manera el empuje hidrostático sobre cada sección resulta:

$$P_1 = \gamma * A_1 * \bar{Y}_1$$

$$P_2 = \gamma * A_2 * \bar{Y}_2$$

#### 2.2.6. PESO DE VOLUMEN DE CONTROL

En dos secciones, la componente del peso se puede expresar matemáticamente en función de sus áreas (Bladé et al., 2009):

$$W_x = \gamma * \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) * L_{12} * \sin\theta$$

Donde  $L_{12}$  es la distancia entre dos secciones 1 y 2.

El seno del ángulo  $\theta$  puede expresarse como:

$$\sin\theta = \frac{z_2 - z_1}{L_{12}} = i_{12}$$

Este valor concuerda con el valor de la pendiente geométrica, por lo tanto, se tiene:

$$W_x = \gamma * \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) * L_{12} * i_{12}$$

### 2.2.7. FRICCIÓN SOBRE EL CONTORNO

La fricción sobre el contorno en un flujo, se puede expresar (Bladé et al., 2009):

$$F_f = \tau * \overline{P}_{12} * L_{12}$$

Donde:

$P_{12}$  Es el perímetro mojado medio entre las secciones 1 y 2.

$\tau$  Corresponde a la tensión tangencial media sobre el contorno.

El valor de la tensión tangencial media se puede obtener a partir de

$$\tau = \gamma * \overline{R}_{h12} * I_{12}$$

Siendo:

$R_{h12}$  El radio hidráulico medio entre dos secciones 1 y 2.

$I_{12}$  Corresponde a la pendiente motriz media entre dos secciones 1 y 2.

Así resulta:

$$F_f = \gamma * \left( \frac{A_1 + A_2}{2} * \frac{1}{\overline{P}_{12}} \right) * I_{12} * \overline{P}_{12} * L_{12}$$

$$F_f = \gamma * \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) * I_{12} * L_{12}$$

### 2.2.8. PENDIENTE MOTRIZ - ECUACIÓN DE MANNING

La ecuación utilizada para evaluar las pérdidas friccionales es la de Manning, ecuación ampliamente utilizada en la modelación hidráulica, tanto de canales como de corrientes naturales. (Bladé et. al., 2009)

El software HEC RAS calcula, a partir de la fórmula de Manning las pérdidas de cargas continuas, se expresa matemáticamente:

$$I = \frac{n^2 \times v^2}{R_h^{\frac{4}{3}}}$$

Esta ecuación en función del caudal se expresa:

$$I = \frac{n^2}{R_h^{\frac{4}{3}}} \times \frac{Q^2}{A^2}$$

Siendo el factor de transporte (K):

$$I = \frac{Q^2}{K^2}$$

$$K = \frac{R_h^{\frac{4}{3}} \times A}{n}$$

Estas expresiones se obtienen de la velocidad y del tirante o calado en una sección. La resolución numérica del perfil se desarrolla a partir de la hipótesis de que la energía que se disipa entre dos secciones se puede calcular a partir de las respectivas pendientes motrices (Bladé et al., 2009):

A partir de ponderaciones se pueden obtener la pendiente motriz en dos secciones:

Ecuación de factor de transporte medio:  $I = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_{T1} + K_{T2}} \right)^2$

Media aritmética:  $I = \frac{I_1 + I_2}{2}$

Media geométrica:  $I_{12} = \sqrt{I_1 \times I_2}$

Media armónica:  $I_{12} = \frac{2 \times I_1 \times I_2}{I_1 + I_2}$

El método más usado es la media aritmética, no obstante, el HEC RAS elige el método más eficaz para cada caso.

### **2.2.9. COEFICIENTE DE RUGOSIDAD**

Para determinar el coeficiente de rugosidad, hay que tener cuatro enfoques generales (Chow, 1994):

- 1) Comprender los factores que afectan a  $n$ , con el fin de entender el problema y reducir el nivel de incertidumbre.
- 2) Consultar un cuadro de valores típicos de  $n$  para varios tipos de canales.
- 3) Examinar y familiarizarse de algunos canales típicos cuyos coeficientes de rugosidad son conocidos.
- 4) Determinar el valor de  $n$  a través de un procedimiento analítico que se basa en la distribución de velocidades teóricas en la sección transversal.

#### **2.2.9.1. FACTORES QUE AFECTAN AL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD**

En el primer enfoque, se debe tener en cuenta que los factores que afectan a  $n$  están interrelacionados entre sí. Dentro de estos factores, se deben considerar la rugosidad de la superficie, la vegetación, la irregularidad del canal, el alineamiento del canal, la sedimentación y socavación, la presencia de obstrucciones y sus características de tamaño, forma, número dentro del canal que tienden a incrementar el  $n$ . El tamaño y forma del canal, nivel y caudal, el cambio estacional puede originar crecimiento de vegetación en el lecho del caudal y, a su vez, variación en el coeficiente  $n$ , materia en suspensión y carga del lecho.

#### **2.2.9.2. TABLA DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING**

Para una rápida determinación del coeficiente  $n$ , la tabla 1 se compiló a partir de diferentes fuentes y presenta valores de  $n$  para distintas clases de canales, teniendo un alcance muy amplio (Chow, 1994).

### 2.2.9.3. SECCIONES CON RUGOSIDAD COMPUESTA

Para canales que presentan distinto tipo de rugosidad en diferentes tramos del perímetro húmedo, es necesario calcular un valor equivalente  $n$  para el perímetro completo y usar este valor para el cálculo en toda la sección. Un criterio desarrollado por Horton y Einstein consiste en suponer que cada parte del área mojada tiene la misma velocidad media, la cual es al mismo tiempo igual a la velocidad media del área mojada total (Chereque, 1987), y se puede expresar matemáticamente:

$$V_1 + V_2 + V_3 = V_N$$

$$n = \left[ \frac{P_1 n_1^{3/2} + P_2 n_2^{3/2} + \dots + P_N n_N^{3/2}}{P} \right]$$

Dónde:

$n$  = Valor de rugosidad único para todo el perímetro

$P_1$  = Perímetro en la sección del área  $A_1$

$n_1$  = Rugosidad en la sección del área  $A_1$

$P_2$  = Perímetro húmedo en la sección del área  $A_2$

$n_2$  = Rugosidad en la sección de área  $A_2$

$P$  = Perímetro húmedo total

Tabla 1  
Valores del coeficiente de rugosidad  $n$

Tipo de Canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
<b>B. Canales revestidos o desarmables</b>			
<b>B-1</b>			
<b>Metal</b>			
a. Superficie lisa de acero			
1. Sin Pintar	0.011	0.012	0.014
2. Pintada	0.012	0.013	0.017
b. Corrugado	0.021	0.025	0.030
<b>B-2 No Metal</b>			
a. Cemento			
1. Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
b. Madera			
1. Cepillada, sin tratar	0.010	0.012	0.014
2. Cepillada, creosotada	0.011	0.012	0.015
3. Sin cepillar	0.011	0.013	0.015
4. Lámina con listones	0.012	0.015	0.018
5. Forrada con papel impermeabilizante	0.010	0.014	0.017
c. Concreto			
1. Terminado con llana metálica (palustre)	0.011	0.013	0.015
2. Terminado con llana de madera	0.013	0.015	0.016
3. Pulido, con gravas en el fondo	0.015	0.017	0.020
4. Sin pulir	0.014	0.017	0.020
5. Lanzado, sección buena	0.016	0.019	0.023
6. Lanzado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
7. Sobre roca bien excavada	0.017	0.020	
8. Sobre roca irregularmente excavada	0.022	0.027	
d. Fondo de concreto terminado con llana de madera y con lados de			
1. Piedra labrada, en mortero	0.015	0.017	0.020
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.017	0.020	0.024
3. Mampostería de piedra cementada, recubierta	0.016	0.020	0.024
4. Mampostería de piedra cementada	0.020	0.025	0.030
5. Piedra suelta con riprap	0.020	0.03	0.035
e. Fondo de gravas con lados de			
1. Concreto encofrado	0.017	0.02	0.025
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.020	0.023	0.026
3. Piedra suelta o riprap	0.023	0.033	0.036

---

f. Ladrillo			
1. Barnizado o lacado	0.011	0.013	0.015
2. En mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
g. Mampostería			
1. Piedra partida cementa	0.017	0.025	0.030
2. Piedra suelta	0.023	0.032	0.035
h. Bloques de piedra labrados	0.013	0.015	0.017
i. Asfalto			
1. Liso	0.013	0.013	
2. Rugoso	0.016	0.016	
j. Revestimiento vegetal	0.030		0.500
C. Excavado o dragado			
a. En tierra, recto y uniforme			
1. Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
2. Limpio, después de exposición a la intemperie	0.018	0.022	0.025
3. Con gravas, sección uniforme, limpio	0.022	0.025	0.030
4. Con pastos cortos, algunas malezas	0.022	0.027	0.033
b. En tierra, serpenteante y lento			
1. Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Pastos, algunas malezas	0.025	0.030	0.033
3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
4. Fondo en tierra con lados en piedra	0.028	0.030	0.035
5. Fondo pedregoso y bancas con malezas	0.025	0.035	0.040
6. Fondo en cantos rodados y lados limpios	0.030	0.040	0.050
c. Excavado con pala dragado			
1. Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2. Matorrales ligeros en las bancas	0.035	0.050	0.060
d. Cortes en roca			
1. Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
2. Afilados e irregulares	0.035	0.040	0.050
e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar			
1. Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo	0.050	0.080	0.120
2. Fondo limpio, matorrales en los lados	0.040	0.050	0.080
3. Igual, nivel máximo de flujo	0.045	0.070	0.110
4. Matorrales densos, nivel alto	0.080	0.100	0.140
D. Corrientes naturales			
D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 100 pies)			
a. Corrientes en planicies			

---

1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunas pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070

Fuente: Chow (1994).

### 2.2.10. PÉRDIDAS DE CARGA POR EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN.

Las pérdidas de carga por expansión y contracción son consideradas pérdidas de carga localizadas (Bladé et al., 2009) y son calculadas por la siguiente expresión:

$$\Delta h_{local} = \lambda \left| \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right|$$

Donde:

$\lambda$ =Coeficiente de contracción y expansión.

Los coeficientes de expansión y contracción son la causa común de pérdida de energía entre las secciones transversales. Los valores comunes para el coeficiente de contracción y expansión para flujo subcrítico son 0.1 y 0.3 respectivamente. Para el caso de un cambio de sección mayor, en el caso de un puente, pueden ser 0.3 y 0.5 respectivamente. En cambios de sección abrupta, 0.6 y 0.8 respectivamente. Para flujos supercríticos, los coeficientes de contracción y expansión pueden ser,



para cambios graduales de sección, 0.01 y 0.03 respectivamente y para cambios abruptos 0.05 y 0.2 y en canales trapezoidales se pueden despreciar (Mamani, 2014).

### **2.2.11. MODELACIÓN HIDRÁULICA**

Para Cea et al. (2014), con la resolución por métodos numéricos de unas ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis, se puede modelar matemáticamente el flujo de un río y predecir los valores de las variables hidráulicas (calado, velocidad, caudal, etc.).

Se pueden utilizar modelos unidimensionales o bidimensionales en el estudio de los efectos de la propagación de avenidas en ríos. Cada vez existe la necesidad de estudiar fenómenos más complejos, y se observa que en la naturaleza existen situaciones donde el flujo parece ser efectivamente bidimensional.

Los modelos toman, principalmente, datos geográficos que brindan la descripción física del área y datos de flujo que proporcionan información sobre descargas o caudales (Moya et al., 2016). Existen, actualmente, una gran cantidad de programas destinados al modelamiento hidráulico tanto libres como comerciales en 1D y 2D.

#### **2.2.11.1. MODELOS UNIDIMENSIONALES**

El modelamiento unidimensional es el más usado en simulaciones de ríos y canales por su simplicidad al ingreso de datos y resultados que permiten saber los niveles a lo largo de un sistema fluvial o de canales y la distribución de caudales (Mamani, 2014). Dentro de los muchos métodos de simulación se puede encontrar lo siguiente:

- Cálculo aproximado de tirante de inundación.
- Modelo de Saint Venant
- Modelo HEC RAS

A continuación, se desarrolla el modelo de Saint Venant.

Los modelos unidimensionales de simulación de régimen variable se basan en la resolución de las ecuaciones completas de Saint-Venant en una dimensión. Estas son ecuaciones diferenciales parciales de continuidad y movimiento, bajo ciertas condiciones de fronteras, son denominadas ecuaciones de flujo no permanente unidimensionales para canales abiertos (Yzocupe, 2006). El aumento de la capacidad computacional de los ordenadores desarrollada en los últimos años permite la resolución íntegra de las ecuaciones sin necesidad de métodos aproximados como el método de la onda cinemática, difusiva o métodos hidrológicos que eran muy útiles y utilizados hace unos años (Guarniz, 2014).

Se han utilizado diferentes esquemas numéricos para tratar de resolver las ecuaciones de Saint-Venant en una dimensión, algunos esquemas usan las ecuaciones completas y otros realizan simplificaciones; donde se desprecian los términos con menor contribución (Bladé, 2005).

#### **2.2.11.2. MODELOS BIDIMENSIONALES**

Los modelos unidimensionales son utilizados para describir fenómenos naturales tales como la inundación de una gran llanura, la confluencia de dos cauces, el flujo en un cauce ancho e irregular y en general todos aquellos sistemas donde, se presente un movimiento de flujo en dos dimensiones. Dentro de los métodos utilizados para resolver las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones se tiene los métodos en diferencias finitas, y métodos en elementos finitos y, además, se ha utilizado la técnica de discretización en volúmenes finitos (Cuervo, 2012).

Los esquemas numéricos en dos dimensiones tienen los mismos problemas que para una dimensión cuando aparecen discontinuidades en la solución, como resaltos hidráulicos. En los últimos años, se ha realizado esfuerzos para conseguir esquemas bidimensionales de alta resolución (Bladé, 2005).

### 2.2.11.3. MODELO HIDRÁULICO EN HEC RAS

HEC RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) es un programa integrado de modelamiento hidráulico, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos de Norteamérica, siendo uno de los modelos más difundidos por ser un software de libre disponibilidad, implantando desde su última versión 5.0.3, tanto modelamientos en 1D como en 2D.

#### A. MODELOS UNIDIMENSIONALES EN HEC RAS

El HEC-RAS tiene como objetivo calcular las elevaciones de las superficies de agua en cualquier punto o ubicación de interés, ya sea por un conjunto dado de datos de flujo (simulación de flujo permanente) o a través del tránsito de hidrogramas (simulación de flujo no permanente) (Velasquez, 2015). Una hipótesis en la que se basan los cálculos del HEC RAS es que considera el flujo simulado como unidimensional, es decir, que la única componente de velocidad que se considera es la del componente de dirección del movimiento, despreciándose las direcciones verticales y transversales al movimiento. (Bladé et al., 2009).

HEC-RAS es, actualmente, apto de llevar a cabo cálculos de perfil de superficie de agua unidimensionales para la circulación gradualmente variada en canales naturales o lechos de régimen subcrítico, supercrítico y mixto. Para el cálculo de los perfiles de agua, el modelo se basa en las ecuaciones de energía y pérdidas por fricción las cuales se resuelven por iteraciones sucesivas (Mamani, 2014).

El sistema HEC-RAS contiene tres componentes de análisis hidráulico unidimensional (Bladé et al. 2009), como se detalla a continuación.

- Cálculo de perfil de la lámina de agua en régimen permanente gradualmente variado. Tiene la capacidad de simular un régimen lento, rápido y combinar ambos simultáneamente. HEC RAS usa el balance de energía entre dos secciones y las resuelve paso a paso por el método iterativo. Usa la fórmula de Manning para calcular las pérdidas de energía repartidas y utiliza por defecto coeficientes de pérdidas localizadas por expansión y contracción. HEC RAS, usa la ecuación de cantidad de

movimiento para el caso de régimen rápidamente variado; régimen combinado rápido y lento (resalto hidráulico), hidráulica de puentes, así como para determinar perfiles lámina de agua cuando confluyen ríos.

- HEC-RAS tiene un módulo que simula en régimen variable (no permanente) con versatilidad de cálculo.
- HEC-RAS cuenta con un módulo que estima el transporte de sedimentos para lechos móviles.

El HEC-RAS, para el cálculo en régimen variable, resuelve las ecuaciones de Saint-Venant en una dimensión, la cual toma las ecuaciones de continuidad y de conservación de la cantidad de movimiento en un sistema de derivadas, utilizando para la solución el esquema de Preissmann o esquema de los cuatro puntos, siendo un esquema implícito en diferencias finitas (Cuervo, 2012).

$$f(x, t) = \theta[\psi f_{j+1}^{i+1} + (1 - \psi) f_j^{i+1}] + (1 - \theta)[\psi f_j^{i+1} + (1 - \psi) f_j^i]$$

Para las derivadas espaciales y temporales, respectivamente:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \theta \frac{f_{j+1}^{i+1} - f_j^{i+1}}{\Delta x_j} + (1 - \theta) \frac{f_{j+1}^i - f_j^i}{\Delta x_j}$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \psi \frac{f_{j+1}^{i+1} - f_{j+1}^i}{\Delta t_i} + (1 - \psi) \frac{f_j^{i+1} - f_j^i}{\Delta t_i}$$

En el régimen variable o transitorio, las variables dependen del tiempo, lo que supone una gran ventaja a la hora de estudiar la propagación de hidrogramas, ondas de rotura etc. Gracias a los modelos en régimen variable, es posible la laminación de caudales en un tramo largo, conocer el volumen de inundación asociado a una avenida, conocer el tiempo de llegada del caudal pico en una avenida (Guarniz, 2014).

## B. VENTAJAS DEL MODELO UNIDIMENSIONAL HEC-RAS

El modelo HEC RAS tiene las siguientes ventajas (Quispe y Sullca, 2015):

- Un modelo unidimensional permite realizar cálculos en áreas muy extensas, de modo que los cálculos en las simulaciones de kilómetros de ríos se realizan con gran velocidad (orden de segundos). Esto hace que el HEC RAS tenga una capacidad corrección y repetición de cálculo muy alta.
- Usa las ecuaciones de energía para el balance entre secciones, siendo este bastante aproximado para resolver problemas fluviales de gran escala.
- Simplifica el flujo turbulento tridimensional a un flujo unidimensional, esta simplificación es relativamente aceptable para grandes escalas en ríos con precisiones no muy exigentes.
- Permite el análisis de ríos naturales con secciones irregulares, en cauces principales y llanuras de inundación. Siendo esta una gran ventaja sobre otro tipo de modelos hidráulicos existentes.
- Simplicidad de creación, modificación y edición de geometrías, permite el ingreso de datos de rugosidad y estructuras, obras de paso, etc. El HEC-RAS, tiene una interface que permite la presentación de resultados y edición de figuras de una manera muy cómoda.
- HEC-RAS tiene la capacidad de importación y exportación de datos en entorno Windows, pudiendo exportar datos para Autocad, Microsoft Word, Microsoft Excel para la presentación de resultados.
- HEC RAS, tiene compatibilidad con la tecnologías SIG (Sistemas de Información Geográfica), la cual genera la geometría del cauce del río con mayor precisión, y elabora formatos importables Hec-Ras (. geo). Asi también, existen extensiones para el Post-proceso de generación de láminas de inundación y mallas ("grids") en análisis de inundación y velocidad.
- HEC-RAS tiene una gran popularidad de uso en el mundo.
- HEC-RAS es software gratis.

### C. ÚLTIMA VERSIÓN DE HEC RAS 5.0.3

La última versión adiciona algunas capacidades como:

- Modelamiento de flujo inestable en 1D y 2D.
- Empleo de ecuaciones de Saint-Venant y Onda Difusa en 2D.
- Esquema numérico empleado: Volumen finitos implícitos.
- Algoritmo de solución para el acoplamiento de modelos en 1D y 2D.
- Mallas computacionales estructuradas y no estructuradas.
- Tabla detallada de propiedades hidráulicas para celdas y contornos de celdas 2D.

La simulación numérica bidimensional (2D) es una importante herramienta para simular y analizar inundaciones. El modelo HEC-RAS es uno de los más populares modelos hidráulicos (Moya et al., 2016). El modelo matemático del HEC-RAS se sustenta en las ecuaciones de Saint Venant:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) = - \frac{n^2 p g \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + pf$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) = - \frac{n^2 q g \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + qf$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy})$$

Donde  $h$  es la profundidad del flujo en metros (m);  $p$  y  $q$  son flujo específico en las direcciones  $x$  e  $y$  ( $m^2/s$ );  $\xi$  es la elevación de la superficie (m);  $g$ , la aceleración de la gravedad;  $n$ , el coeficiente de Manning;  $\rho$  la densidad del agua  $Kg/m^3$ .  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{yy}$  y  $\tau_{xy}$  son los componentes del esfuerzo cortante efectivo y  $f$  es coriolis ( $s^{-1}$ ). Cuando se selecciona el método de la onda difusa, los términos inerciales de las ecuaciones de momento se desprecian.

## D. REQUISITOS BÁSICOS DE DATOS EN HEC RAS

El programa requiere los siguientes datos: el tipo del régimen de flujo, la elevación inicial, caudal, los coeficientes de pérdida, las características geométricas de la sección transversal y la longitud del trecho. Adicionalmente, el HEC RAS tiene capacidades para determinar áreas de inundación y aliviaderos de crecidas, determina pérdidas de energía, pérdidas por fricción, cálculo de tirante crítico, solución directa del coeficiente  $n$  de Manning, insertar automáticamente secciones transversales generadas por el programa, especificar áreas de flujo no efectivas, y opciones de flujo efectivo que pueden simular el depósito de sedimentos, cubicar terraplenes y plataformas de puentes (Mamani, 2014).

### 2.2.12. PERIODOS DE RETORNO Y RIESGO EN OBRAS

Periodo de retorno ( $T$ ) se define como el tiempo promedio (en años), en que el caudal pico de una avenida es igualado o superado en promedio por lo menos una vez cada " $T$ " años. Considerando que los eventos anuales son independientes, es posible calcular la probabilidad de falla para una vida útil de  $n$  años (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011).

Para realizar el diseño de una obra se tiene que adoptar el periodo de retorno considerando que existe una relación entre la probabilidad de excedencia de un evento, la vida útil de la estructura y el riesgo de falla admisible.

El riesgo de falla admisible se expresa matemáticamente:

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

Conociendo la vida útil de la obra de  $n$  años, la fórmula permite el cálculo del período de retorno  $T$ , considerando  $R$  (riesgo de falla admisible), el cual es la probabilidad de ocurrencia, durante la vida útil de la obra, del pico de la creciente estudiada (figura 2).

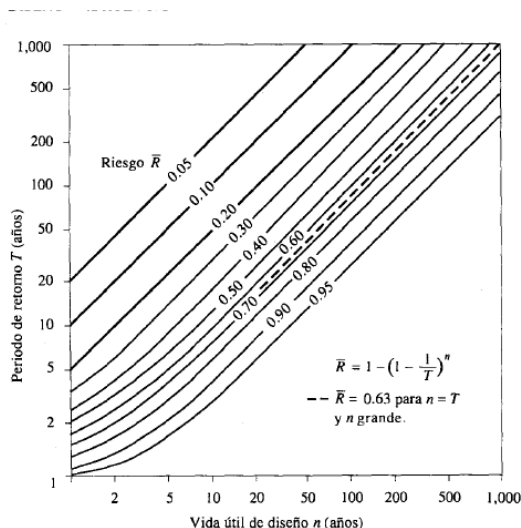


Figura 2 Riesgo de por lo Menos una Excedencia del Evento de Diseño Durante la Vida Útil

Fuente: Chow et al., (1994). Hidrología aplicada.

En la tabla 2 se muestra el valor  $T$  en distintos riesgos permisibles  $R$  y para la vida útil  $n$  de la obra.

Tabla 2  
Valores de período de retorno  $T$  (años)

RIESGO ADMISIBLE	VIDA ÚTIL DE LAS OBRAS (n años)									
	1	2	3	5	10	20	25	50	100	200
R	1	2	3	5	10	20	25	50	100	200
0,01	100	199	299	498	995	1990	2488	4975	9950	19900
0,02	50	99	149	248	495	990	1238	2475	4950	9900
0,05	20	39	59	98	195	390	488	975	1950	3900
0,10	10	19	29	48	95	190	238	475	950	1899
0,20	5	10	14	23	45	90	113	225	449	897
0,25	4	7	11	18	35	70	87	174	348	695
0,50	2	3	5	8	15	29	37	73	154	289
0,75	1,3	2	2,7	4,1	7,7	15	18	37	73	144
0,99	1	1,11	1,27	1,66	2,7	5	5,9	11	22	44

Fuente: Monsalve (1999).



Tomando en cuenta los valores presentados en la tabla 3 se recomienda utilizar un Riesgo admisible como máximo, para puentes, un riesgo admisible de 25% y para defensas ribereñas, un riesgo admisible de 25%. La vida útil para obras de puentes y defensas ribereñas es de 40 años (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011).

Tabla 3  
*Valores máximos recomendados de riesgo admisible de obras de drenaje*

<b>TIPO DE OBRA</b>	<b>RIESGO ADMISIBLE (%)</b>
Puentes (*)	25
Alcantarillas de paso de quebradas importantes y badenes	30
Alcantarillas de paso 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 (2011)

### 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

#### - **Avenida**

Se entiende por avenida a un caudal muy grande de escorrentía superficial que sobrepasa la capacidad de transporte del canal generando la inundación de tierras aledañas. Las inundaciones traen, como es sabido problemas de toda índole en diversas áreas de la actividad humana (Vásquez, 2016).

#### - **Caudal crítico**

Caudal que mantiene en un canal el régimen crítico en una sección dada para un calado determinado (Organización Meteorológica Mundial, 2012).

- **Ciclo Hidrológico**

Se denomina ciclo hidrológico, al conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.) (Villón, 2002).

- **Cuenca hidrológica**

La cuenca de drenaje de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido (Villón, 2002).

- **Escorrentía superficial**

Es la precipitación que no se infiltra en ningún momento y llega a la red de drenaje moviéndose sobre la superficie del terreno por la acción de la gravedad. Corresponde a la precipitación que no queda tampoco detenida en las depresiones del suelo, y que escapa a los fenómenos de evapotranspiración. (López y Mintegui, 1986).

- **Gradiente hidráulico**

Es la línea que indica por su descenso vertical la energía perdida entre dos secciones (para el movimiento uniforme) (Rocha, 2007).

- **Inundación**

Según la Organización Meteorológica Mundial, (2012) en el *Glosario hidrológico internacional* se define como:

- 1) Desbordamiento de agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua.

- 2) Acumulación de agua procedente de drenajes en zonas que normalmente no se encuentran anegadas.
- 3) Encharcamiento controlado para riego.

- **Periodo de retorno**

El "período de retorno o de recurrencia" (T) es el intervalo medio expresado en años en el que un valor extremo alcanza o supera al valor "x", al menos una sola vez (Elías y Ruiz, 1979)

- **Pendiente de un cauce**

La pendiente de tramo de un 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 (Villón, 2002).

- **Pendiente crítica**

Es el valor particular de la pendiente del fondo del canal, para la cual éste conduce un caudal Q en régimen uniforme y con energía específica mínima, o sea, que en todas sus secciones se tiene el tirante crítico, formándose el flujo crítico uniforme. (Villón, 2007)

- **Perfil hidráulico**

El perfil que adopta la superficie libre del agua en cualquier condición de flujo en un canal se conoce como perfil de flujo o perfil hidráulico (Sotelo, 2002).

- **Precipitación**

Es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones y análisis, forman el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control de agua (Villón, 2002).

- **Régimen de flujo**

Estado del flujo en corrientes aluviales que se caracteriza por el perfil de fondo (Organización Meteorológica Mundial, 2012).

- **Rugosidad superficial**

La rugosidad superficial se representa por el tamaño y la forma de los granos del material que forman el perímetro mojado y que producen un efecto retardador del flujo. Por lo general éste se considera como el único factor para la selección de un coeficiente de rugosidad (Chow , 1994).

- **Vulnerabilidad**

La vulnerabilidad, es el grado de debilidad o exposición de un elemento o conjunto de elementos frente a la ocurrencia de un peligro natural o antrópico de una magnitud dada. Es la facilidad como un elemento (infraestructura, vivienda, actividades productivas, grado de organización, sistemas de alerta y desarrollo político institucional, entre otros), pueda sufrir daños humanos y materiales (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2006).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

Según la recolección de datos, se trató de una investigación con un diseño de campo, debido a que los datos que se utilizaron para procesar la información se recogieron en un ambiente natural en el que no hubo manipulación de variables. Asimismo, la investigación se caracterizó por tener un tipo descriptivo, dado que se observaron y describieron eventos y situaciones sin influir sobre él de ninguna manera, de la misma forma, se realizaron pruebas para validar el modelo hidráulico HEC RAS.

#### **3.2. POBLACIÓN Y/O MUESTRA DE ESTUDIO**

Siendo una investigación, que estuvo sobre la base de información física y geográfica, se tomó como población de estudio la defensa ribereña de Calana (río Caplina).

##### **3.2.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

###### **A. UBICACIÓN POLÍTICA**

La zona de estudio se encuentra ubicado políticamente en:

Departamento	:	Tacna
Provincia	:	Tacna
Distrito	:	Calana

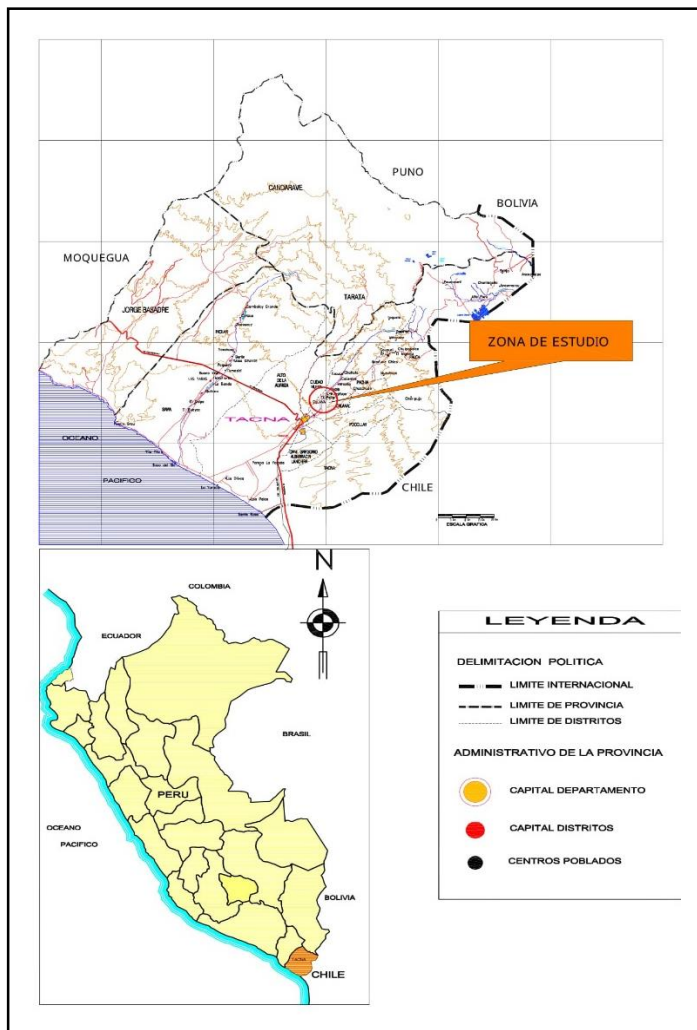


Figura 3 Ubicación de la zona de estudio

**B. UBICACIÓN GEOGRÁFICA**

La zona de estudio comprende la Defensa Calana entre el puente de la carretera Calana-Pachia y aguas arriba a aproximadamente 1.00 km., para el presente trabajo se ha tomado coordenadas de inicio y fin del tramo estudiado siendo los siguientes:

Tabla 4  
Ubicación geográfica zona de estudio

COORDENADAS DE INICIO DEL TRAMO	COORDENADAS DE FIN DEL TRAMO	ALTITUD PROMEDIO
373984E 8014206W	374174E 8013139W	819 m.s.n.m

### 3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

#### 3.3.1. MATRIZ DE VARIABLES

Tabla 5  
*Matriz de Variables*

Variable	Definición operacional	Dimensión	Indicador
<b>Vulnerabilidad</b>	- Nivel de exposición a fallas de las estructuras de la defensa ribereña.	- Características de las estructuras de la defensa.	- Caudales - Estructuras - Dimensiones
<b>Modelación hidráulica</b>	- Introducción de los datos recopilados en campo al software HEC RAS.	- Manejo correcto del software. - Datos obtenidos en campo	- Resultados de cálculos hidráulicos.
<b>Parámetros físicos y morfológicos</b>	- Comportamiento de las estructuras ante máximas avenidas.	- Características estructurales de las obras. - Características físicas de la topografía del lugar	- Dimensiones de las secciones. - Rugosidad. - Pendiente. - Terreno.

#### 3.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

##### 3.3.2.1. CLIMATOLOGÍA

Los factores de clima influyen en la alteración de las propiedades físicas y químicas de las rocas y materiales (INGEMMET, 2009), por ello es importante el conocimiento de la intensidad y ocurrencia de dichos factores en el área de estudio y en la cuenca Caplina, donde se encuentra comprendido.

El clima es del tipo desértico, con escasas precipitaciones pluviales que se presentan en forma de garúas durante los meses de invierno originadas por las densas neblinas que se levantan del litoral. Las lluvias anuales que norman el

régimen de los ríos cercanos a la zona de estudio se producen durante el verano austral a lo largo de la región andina, desde alturas superiores a las 2000,00 m.s.n.m (Frisancho, 2015).

Las mayores precipitaciones de lluvia se dan en las estaciones de Palca y Toquela alcanzando 129.05 mm. Presentándose las mínimas en las estaciones de La Yarada, Magollo, Calana y Calientes con precipitaciones que alcanzan hasta los 20.97 mm anuales. En los meses de enero a marzo, se presentan las temperaturas más altas, alcanzando los 21 °C y 23 °C; siendo la temperatura promedio de la cuenca Caplina de 17.02 °C; y en la cabecera de la cuenca Caplina la temperatura promedio es de 3.30 °C.; registrándose en los meses de junio hasta parte de setiembre las temperaturas más bajas, entre los 13 °C y los 17 °C. En cuanto a la humedad relativa, en la zona de Calana alcanza un promedio anual de 76% con valores de 80%, en los meses más húmedos del año (Mayo a Octubre) y de 73% en los meses más secos del año (Noviembre a Abril) (Vilcanqui, 2016).

### **3.3.2.2. GEOLOGÍA**

El INGEMMET, en su boletín "*Hidrogeología de la cuenca del río Caplina*", indica que la cuenca del río Caplina regionalmente se encuentra formada por rocas con edades que varían del paleozoico al cuaternario reciente, y describe la estratigrafía y la geología estructural de la cuenca de la siguiente manera.

#### **3.3.2.2.1. ESTRATIGRAFÍA**

##### **A) PALEOZOICO**

###### **Proterozoico**

*Basamento Metamórfico Mal Paso (Pe-mp/gn)*

Los afloramientos se extienden en dirección NNO-SSE. Están compuestas por laminaciones hornblenda con mica y feldespatos con cuarzo, en algunos afloramientos vetas o pequeños diques de pegmatita compuesta por ortosa, muscovita y cuarzo.



### *Formación Machani (D-ma)*

Conformada por conglomerados subredondeados a redondeados de rocas retrabajadas de gneises, proseguidos de una secuencia que intercala limolitas negras fisibles en forma continua, con areniscas cuarzosas de coloración gris oscuro de grano fino a medio en capas delgadas a medianas tabulares. En la parte media, areniscas pardas oscuras a gris claras de grano fino a medio con capas de lutitas negras. La secuencia superior está conformada por areniscas pardas amarillentas que se intercalan con limolitas oscuras y algunos niveles de areniscas calcáreas en capas medianas.

### **Carbonífero**

#### *Grupo Ambo (C-am)*

Aflora a lo largo del flanco oriental en los cerros Ancocalani y Chinchillane como una franja estrecha de dirección NNO-SSE. En la quebrada Ancosontine, los estratos del Grupo Ambo se hallan en contacto con rocas graníticas y son bastante plegados. Se observa que la base está conformada por una sucesión de estratos de conglomerados con clastos de cuarzo, con esporádicos clastos de areniscas y lutitas. Los clastos de esta formación tienen forma redondeada a sub redondeada, con un diámetro que varía de 0,2 a 5 centímetros y están distribuidos en canales fluviales consecutivos con figuras de canal y clastos imbricados. Con matriz de areniscas de grano medio a fino.

## **B) MESOZOICO**

### **Jurásico inferior**

#### *Formación Junerata (Ji-ju)*

Los afloramientos de la formación Junerata se hallan en la parte media de la cuenca del río Caplina, presentándose como la base de toda la pila sedimentaria. La formación Junerata sobreyace al Grupo Ambo e infrayace en contacto erosivo a la formación Pelado, y se observan en el cerro Junerata.

Litológicamente, está compuesta de una serie de coladas basálticas que en algunos niveles se encuentran ínter estratificadas con bancos de sedimentos.

### *Formación Pelado (Ji-pe)*

Se observa en los cerros Pelado, Palquilla y en el sector de Tres Cruces al norte de cerro San Francisco.

Esta formación se encuentra sobreyaciendo a las rocas volcánicas de la formación Junerata en evidente contacto erosivo. El contacto de esta unidad con la suprayacente formación San Francisco es también erosivo, demostrado por la presencia de clastos de roca calcárea perteneciente a la formación Pelado dentro de los sedimentos de la formación San Francisco.

### **Jurásico medio-inferior**

#### *Formación San Francisco (Jm-sf)*

La formación San Francisco suprayace a la formación Pelado con un contacto erosivo, e infrayace a la formación Ataspaca. Conformado por areniscas, lutitas y calizas.

### **Jurásico medio-superior**

#### *Formación Ataspaca (Js-a)*

La formación Ataspaca suprayace a la formación San Francisco e infrayace a la Formación Chachacumane. Ambos contactos son concordantes y transicionales. Comprenden areniscas pardas, lutitas oscuras y calizas grisáceas interestratificadas en capas delgadas.

### **Jurásico superior-cretáceo inferior**

#### *Formación Chachacumane (Jk-cha)*

Sobreyace a la formación Ataspaca de manera transicional e infrayace con una marcada discontinuidad litológica a la formación Chulluncane. Esta formación está compuesta principalmente de areniscas cuarcíticas grises y cuarcitas gris claras a blancas, en su mayoría macizas, que se alternan con niveles de lutitas negras a gris oscuras.

### **Cretáceo inferior**

#### *Formación Chulluncane (Ki-chu)*

El contacto inferior y superior está en discordancia angular con la formación Chachacumane y los volcánicos de la formación Huilacollo respectivamente. Aflora en la quebrada Quilla y en el corte de la carretera Tacna-Collpa-La Paz. Conformada principalmente por bancos de conglomerados compactos con guijarros bien redondeados de cuarcitas, calizas y rocas volcánicas oscuras (basálticas a andesíticas) principalmente, intercalados con estratos de areniscas líticas de grano medio.

## **C) MESOZOICO - CENOZOICO**

### **Cretáceo superior – Eoceno inferior**

#### *Formación Toquepala (KP-to)*

Se ubica en el centro minero de Toquepala. Bellido y Guevara (1963) muestran con el mismo nombre una gruesa serie discordante de rocas volcánicas intercaladas con conglomerados en el sur peruano. Wilson y García (1962) destacaron un afloramiento continuo de esta serie hasta el cuadrángulo de Palca.

## **D) CENOZOICO**

### **Paleógeno**

#### **Eoceno**

#### *Formación Tarata (Pe-ta)*

Se describe como una serie de brechas y derrames andesíticos estratificados, seguido por conglomerados tufáceos compactos, niveles de areniscas y lutitas verdosas y conglomerados intercalados con areniscas y lutitas verdosas y conglomerados intercalados con areniscas tufáceas de grano grueso. La parte media describen brechas volcánicas, conglomerados tufáceos verdes y violetas seguido por tufos color violeta claro en capas delgadas a medianas. Además de un paquete potente de tufos de color gris claro, con cuarzo y biotita, tufos blancos dacítico y masivo. Concluye su columna con areniscas tufáceas abigarradas en capas delgadas, seguido por paquetes potentes de conglomerado fino y arenisca tufácea de color violeta claro a verdoso, con mucha biotita en la matriz y estratificación delgada.

## **Oligoceno**

### *Formación Huilacollo (Po-hui)*

Aflora en el cerro Huilacollo, se intercalan brechas andesíticas, tobas dacíticas y riódacíticas con uniforme estratificación, algunos niveles se les puede considerar como areniscas tobáceas, los que infrayacen ligeramente y disconforme a la formación Huaylillas; y hacia el norte con los depósitos fluvio glaciares y en discordancia angular a los volcánicos del complejo fisural Barroso.

### *Formación Moquegua superior (Po-mo)*

La formación moquegua aflora en las laderas de los valles, sobreyaciendo en discordancia erosional a estratos Jurásicos-Cretácicos, e infrayaciendo a los volcánicos de la formación Huaylillas. Esta formación la conforma principalmente materiales detríticos, básicamente conglomerados que disminuyen en tamaño de grano hacia el suroeste. En las zonas proximales, tiene una sucesión de conglomerados polimicticos con pequeños lentes de areniscas; mientras, en las zonas dístales, prevalecen las intercalaciones de areniscas y lentes de limolitas, con algunos canales conglomerádicos. En las zonas proximales, es notoria la granocresencia de la sucesión, presentando espesores que no sobrepasan los 250 metros.

## **Neógeno**

### **Mioceno**

### *Formación Huaylillas (Nm-hu)*

La formación Huaylillas ocupa gran parte de la región tacneña. Se observa suprayaciendo a la formación Moquegua superior y, en discordancia, con estratos Mesozoicos en la región noreste.

Su miembro inferior está conformado por tobas rosáceas con gran cantidad fragmentos de líticos y fragmentos de pómez, que se intercalan con niveles de conglomerados con clastos de rocas sedimentarias y volcánicas, sub-redondeadas, con matriz de areniscas cuarzo-feldespáticas de color verde. Se observan canales de areniscas. La formación Huaylillas, en su parte inferior, es restringida a la zona del cerro Chuschuco y Precipicio. El miembro superior comprende una sucesión de

tobas riolíticas y riolíticas, de color rosáceo, con fragmentos de pómez y líticos, intercalados con delgados niveles de areniscas masivas de color verde.

#### *Formación Magollo (Nm-ma)*

Se la observa en los interfluvios de las partes bajas del valle del río Caplina y quebradas conexas, sobreyaciendo directamente a la formación Huaylillas, y en contacto erosional sobre estratos jurásicos en los cerros de La Yarada. La formación Magollo, está conformada por una secuencia de conglomerados y areniscas de coloración gris oscura, con clastos mayormente andesíticos. Sus facies disminuyen progresivamente en tamaño de grano hacia el oeste, con intercalaciones de niveles de areniscas con limolitas y lentes de evaporitas. El espesor de esta unidad varía entre los 40 y 100 metros.

### **Neógeno**

#### **Plioceno**

#### *Conglomerados Calientes (Npl-ca)*

Flores y Sempere (2002), describieron esta formación en la localidad de Calientes (baños termales). En dicho sector, suprayace en contacto erosional a los sedimentos detríticos de la formación Moquegua superior y estratos del jurásico-cretácico, e infrayace a la toba Pachía.

El conglomerado Caliente está conformado por una sucesión de conglomerados polimicticos, con anchos de 100 metros en la localidad de Calientes. El tamaño de sus granos disminuye hacia el suroeste, aumentando también su potencia. Se le observa en la mayoría de pozos perforados en las pampas de La Yarada, compuesta por intercalaciones de areniscas y limolitas, con algunos lentes conglomerádicos

#### *Toba Pachía (Np-pa)*

La Toba Pachia suprayace a estratos mesozoicos en las regiones noreste, y a los conglomerados Calientes en la región suroeste. La toba Pachía es típicamente de color rosado, presenta fragmentos de pómez, líticos, cristales de cuarzo y biotita. Sus depósitos son deleznable, presentándose con espesores menores a 40 metros, disminuyendo hacia el suroeste.

### *Formación Barroso (NQ-ba)*

Conformada por un complejo volcánico. Esta consiste en bancos bien definidos de tufos y lavas de composición traquítica, con cantidades menores de andesita.

## **E) DEPÓSITOS CUATERNARIOS**

### *Depósitos fluvioglaciares*

Predominan con amplia distribución en las zonas de altiplano; al oeste, sobreyacen a los volcánicos Huilacollo y, hacia el noreste, a los volcánicos del grupo Tacaza, forman planicies suavemente onduladas. Está compuesta de bloques polimícticos (volcánicos) mal clasificados en una matriz de grava y arena.

### *Depósitos morrénicos*

Compuestos por una mezcla heterogénea de gravas angulosas de naturaleza volcánica en una matriz de arena y arcilla consolidada, conservando bloques erráticos. Se ubican en las inmediaciones de los estratos volcánicos de El Frayle y el complejo fisural Barroso.

### *Depósitos aluviales*

Tienen una morfología suave de lomadas que forman especies de anfiteatros con escarpas muy altas y casi verticales; Conformados en mayor parte por el derrumbe de la formación Moquegua, presenta litología compuesta de bloques grandes de tufos riolíticos y diversos bloques mezclados en forma caótica con una matriz de arenas y limos del mismo material. Los depósitos aluviales forman pequeñas terrazas en las quebradas Ataspaca, Caplina y Challaviento-

### *Depósitos de cenizas*

Comprenden cenizas volcánicas sueltas de color gris muy claro, lo conforman fragmentos de pómez blanco y cristales bipiramidales de cuarzo y biotita.

### *Depósitos eluviales*

Estos aparecen expuestos principalmente en las lomas y con una coloración variable de acuerdo a su proximidad a las zonas mineralizadas. Litológicamente está formada por bloques, arenas, limos y material regolítico.

### *Depósitos de bofedales*

Compuestos por arenas, ceniza y arcillas, su característica principal es que son reservorios naturales de aguas en las zonas altas. Dentro de estas unidades, se puede observar numerosos aniegos y surgencias de varios manantiales.

### *Depósitos fluviales*

Compuestos por conglomerados redondeados a subredondeados de matriz arenosa, actualmente están en proceso de transporte y depositación, son llevados por los ríos y avenidas de aguas temporales. Los depósitos fluviales se encuentran en el piso de valle y la mayoría en el cauce de los ríos.

### *Depósitos eólicos*

Conformados por arenas finas bien seleccionadas, formados por la acumulación de arena transportada por el viento y se observan cerca del litoral en forma de dunas. Son suelos áridos, con escasa cantidad de arcilla.

## **3.3.2.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

Las rocas antiguas forman grandes bloques limitados por sistemas de fallas que a su vez se encuentran cubiertas por rocas del Mioceno al Cuaternario, las cuales no han sufrido mayor deformación. La tendencia de los buzamientos de las unidades es casi constante y dentro de un bloque se observan pocos plegamientos (INGEMMET, 2009).

En la cuenca, se tiene el SISTEMA DE FALLA INCAPUQUIO, el cual se localiza al norte de Palca. Esta estructura afecta directamente a las rocas de Basamento metamórfico Mal Paso, al grupo Ambo, a las formaciones Junerata, Pelado y San Francisco, y presentan un contacto de fallas inversas con las unidades más jóvenes como los grupos Toquepala y Huaylillas.

### 3.3.2.3. GEOMORFOLOGÍA

En la cuenca del río Caplina, las unidades morfológicas se agrupan en seis grandes grupos: altiplanicie, flancos disectados, mesetas, pampas costeras, cordillera de la costa y piso del valle (INGEMMET, 2009).

#### - **Cordilleras**

Esta unidad se ubica al noreste, en la cabecera de la cuenca. Se encuentra entre 4,500 y 5,600 metros sobre el nivel del mar y se caracteriza por presentar pendientes que superan el 30%. Esta unidad morfológica está cubierta de nieve solamente en época de lluvias y, sin duda, está siendo afectada por el calentamiento global. Desde el punto de vista hidrogeológico, en la parte baja de los nevados, se observa numerosos manantiales, especialmente en las quebradas Piscullani, donde también se registra actividad hidrotermal. La precipitación total multianual llega a 370 milímetros, aunque gran parte cae en forma de nieve y granizo.

#### - **Altiplanicie**

Se encuentra entre 3 800 y 4 500 metros sobre el nivel del mar y se caracteriza por presentar zonas planas en altura. El relieve general varía de ondulado a moderadamente escarpado, posiblemente como consecuencia de la erosión y/o tectónica que afectaron este paisaje. La topografía es de pendiente suave a media y la precipitación fluctúa entre 260 y 330 milímetros (en la región Tacna), y se escurre superficialmente modelando las laderas de los valles.

En estas planicies, se encuentra escasa vegetación compuesta por pastos naturales e ichu; sin embargo, en las laderas colindantes, se encuentran yaretales, tolares, pajonales y bosques naturales.

#### - **Flancos disectados**

Se caracterizan por presentar una topografía muy accidentada originada por la actividad tectónica y la erosión de los ríos. Predominan las laderas de alta pendiente (de 10 a 15%), por lo que las escorrentías son rápidas y en algunos lugares presentan saltos de agua. Se encuentra entre 1 400 y 3 800 metros sobre el nivel del mar.



Durante los veranos muy húmedos, la red hidrográfica funciona plenamente, tal como ocurrió el 9 de febrero del 2001, cuando el río Caplina alcanzó un caudal de 33,22 metros cúbicos por segundo e ingresó torrencialmente a las instalaciones del complejo turístico de Calientes, dejando fuera de operación la infraestructura hidráulica de la bocatoma Calientes.

- **Mesetas**

Los ríos Caplina, Uchusuma y las quebradas menores han erosionado los bordes de terrenos horizontales amplios, quedando como zonas aisladas y elevadas a manera de lomas alargadas, con un perfil transversal casi trapezoidal. La mayoría de estas lomas tienen en sus cimas materiales compactos posiblemente originados durante un período prolongado de estabilidad. Las cumbres son planas y mantienen una altura constante con pendientes entre 2 a 2,5%. Tienen dirección noreste a suroeste y se encuentran entre 200 y 1 400 metros sobre el nivel del mar.

Los cerros Churcos, Hospicio Antiguo y Los Escritos se encuentran entre estas geoformas que son modeladas por agentes como la presión, la temperatura, el viento y las variaciones climáticas extremas.

- **Cadena costera**

Se emplaza paralela a la línea de costa y comprende los cerros La Yarada y La Morena o Pabellones, con una altura máxima de 300 metros sobre el nivel del mar. En la desembocadura del valle de Tacna, la cadena costanera desaparece en las inmediaciones del balneario Llostay y de El Pozo (Perú) para luego emerger en Arica (Chile).

- **Piso de valle**

Formada principalmente por depósitos de origen fluvial. En los valles, se encuentran erosionados, debido a la erosión posterior de los ríos, y alcanzan taludes de 20 metros. Por lo general, tienen pendientes de 1 a 2,5% y la altitud varía de 0 a 1 400 metros sobre el nivel del mar. Las zonas de Arunta, Malos Nombres, los Churcos, Hospicio Antiguo y Escritos conforman esta unidad. Esta superficie es la más amplia hacia el lado oeste de la cuenca.

#### **3.3.2.4. HIDROLOGÍA**

La información hidrométrica demuestra que los ríos Caplina y Uchusuma Bajo o Yungane, tienen características propias de torrente. El río Caplina tiene una

descarga controlada máxima de 33.21 m<sup>3</sup>/s (febrero) y una mínima de 0.115 m<sup>3</sup>/s (marzo), cuya media anual promedio es 0,935 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente, equivalente a una masa total anual de 29.19 Hm<sup>3</sup>. El río Uchusuma Bajo tiene una descarga máxima controlada de 11.06 m<sup>3</sup>/s (Marzo) y una mínima de 0.00 m<sup>3</sup>/s (Setiembre), cuya media anual promedio es 0,586 m<sup>3</sup>/s, que equivale a una masa total anual de 18.45 Hm<sup>3</sup> (Pino, 2013).

Una característica importante de la defensa de Calana, es que solo en épocas de avenidas en los meses de verano esta estructura deriva caudales de aguas provenientes de la parte alta de la cuenca Caplina hacia la quebrada Arunta para luego desembocar en el Océano Pacífico, en el resto del año no existe caudales, presentando un cauce seco.

Las estimaciones de caudales máximos se hacen mediante las metodologías existentes para el cálculo y estimación, estas metodologías parten de información hidrológica y meteorológica y son usadas para el diseño o dimensionamiento de obras hidráulicas, podemos mencionar como métodos estadísticos más usados:

1. Distribución Normal
2. Distribución Log-Normal de 2 Parámetros
3. Distribución Log-Normal de 3 Parámetros
4. Distribución Gamman de 2 Parámetros
5. Distribución Gamman de 3 Parámetros
6. Distribución Log-Pearson Tipo III
7. Distribución -Gumbel
8. Distribución Log-Gumbel

Para realizar el modelamiento hidráulico, el presente trabajo toma los resultados del cálculo hidrológico de la tesis “ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD MEDIANTE MODELAMIENTO HIDRODINÁMICO DEL CAUCE DEL RÍO SECO DEL CONO SUR DE LA CIUDAD DE TACNA” de Felix Frisancho Camero, en cuanto a los resultados de caudales máximos y caudales máximos instantáneos en diferentes escenarios. El autor del estudio mencionado en líneas arriba ha considerado, para la sub cuenca Caplina, los registros de los periodos 1959 al 2013 (55años), cuya información fue proporcionada por el PROYECTO ESPECIAL TACNA (PET); y, para la sub cuenca de la quebrada Palca y Río Yungane, consideró registros de los periodos 1964 al 2007 (44 años), logrando generar los datos faltantes para

uniformizar la información hidrológica mediante el modelo Markoviano. Así también, determinó que el modelo Log Gumbel era el que más se aproxima a la serie histórica. Y, para el cálculo de caudales instantáneos, usó el modelo Transformación Logarítmica (Frisancho, 2015).

Tabla 6  
*Cálculo de caudal instantáneo total de las cuencas Caplina-Palca-Vilavilani*

PERIODO DE RETORNO (T)	CAUDALES MÁXIMOS-CUENCAS			ÁREA CUENCA HÚMEDA KM2			CAUDAL INSTANTÁNEO M3/S			TOTAL
	CAPLINA	PALCA	VILAVILANI	CAPLINA	PALCA	VILAVILANI	CAPLINA	PALCA	VILAVILANI	
10	11.11	2.34	4.33	222.3	23.81	98.67	16.95	4.74	7.23	29
25	19.09	4.88	6.89				29.13	9.9	11.51	51
50	28.52	8.43	9.73				43.52	17.09	16.26	77
75	36.01	11.58	11.89				54.94	23.48	19.87	98
100	42.48	14.5	13.7				64.82	29.4	22.89	117
200	63.18	24.89	19.27				96.4	50.47	32.2	179
500	106.66	50.76	30.23				162.74	102.92	50.51	316
1000	158.46	86.99	42.47				241.78	176.39	70.96	489

Fuente: (Frisancho, 2015).

Es necesario indicar que, para el presente trabajo, se han considerado únicamente caudales líquidos, no incluye los sólidos que pueden transportar los ríos en épocas de avenidas importantes.

En el Anexo 6 se ha hecho un Análisis de Frecuencias con registro de Caudales Máximos desde 1959 al 2012, considerando que en el año 2001 se ha registrado un caudal de 36.774 m<sup>3</sup>/s, de dicho análisis obtenemos que para un periodo de retorno (T) de 25 años un Caudal Máximo de 32.62 m<sup>3</sup>/seg y para 50 años un Caudal Máximo de 36.52m<sup>3</sup>/seg. Estos valores proceden de la serie histórica, por lo tanto es la verdadera máxima calculada para 25 y 50 años y difiere del calculado por el método Distribución Log-Gumbel para 25 y 50 años de periodo de retorno, por lo tanto, los caudales para 25 y 50 años tomados de la Tabla 6, son solo referenciales para la elaboración de la presente Tesis debiendo considerarse con fines educacionales.

### **3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS**

#### **3.4.1. ASPECTOS GENERALES**

Desde el punto de vista hidráulico, el río Caplina comprendido en el encauzamiento Caplina – Arunta, en el tramo de la defensa de Calana, es un curso tipo complejo, ya que, a lo largo de dicho tramo, es posible encontrar diferentes tipos de regímenes, dichos regímenes pueden cambiar de acuerdo con las variaciones de las rugosidades, pendientes y secciones.

La morfología en el tramo de la defensa de Calana se caracteriza como un río joven con gran erosión debido a las corrientes de agua y velocidad de flujo debido a cambios de pendientes longitudinal y transversal desde su inicio en la cabecera de la cuenca. El tramo de la defensa de Calana tiene una pendiente promedio de  $S=2.64\%$ , con abundancia de carga sólida de grano grueso, un escurrimiento variable en épocas de avenidas y riberas fácilmente erosionables.

Con lo mencionado anteriormente, la simulación hidráulica debe tomar los datos recogidos en el campo y los datos encontrados en investigaciones realizadas en la zona de estudio.

#### **3.4.2. INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO**

En esta etapa, se realizó las visitas a campo de la zona de estudio con la intención de obtener, identificar y evaluar la información referida al estado actual de la defensa de Calana, condiciones de la topografía, estado de la estructura y condiciones hidrológicas del área de estudio.

Se realizó el levantamiento topográfico de la zona de estudio para conocer el perfil longitudinal de la defensa. Se desarrolló para determinar las características físicas en la defensa y su cauce, observaciones de detalles estructurales de la defensa, pendientes, secciones transversales, el tipo de terreno para determinar la rugosidad, etc.

Las labores para la toma de datos de campo se ejecutaron en época de estiaje donde el río no presenta caudal. El recorrido se inició aguas arriba, a aproximadamente 1.18 km a partir del puente Calana-Pachía, tomándose como progresiva Km 0+000 y el final corresponde aguas abajo del puente Calana-Pachía.

La obtención de la topografía se hizo con el uso de equipo topográfico (Estación total, Nivel topográfico, GPS, wincha de metálica de 50.00 m y de 8.00 m). Tomando valores y seccionando el cauce cada 20.00 m en tramos largos y 10.00 m. en donde se encontró variaciones importantes de las secciones transversales para una mejor caracterización del tramo a estudiar.

La información topográfica obtenida tiene las siguientes características:

- Está referenciado a Datum WGS 84 (tal como lo establece la Autoridad Nacional del Agua – ANA) referencia IGN, coordenadas UTM 19S.
- Incluye los detalles importantes como las diferentes secciones que cuenta la defensa a lo largo de tramo hasta llegar al puente de la carretera Calana-Pachía.
- El perfil longitudinal se realizó a cada 20 m (tramos largos) y 10m (tramos con cambios de sección).
- Incluye el ancho del cauce principal del río, considerando el tipo de terreno existente para el cálculo del coeficiente de rugosidad.

### **3.4.3. CONDICIONES DEL CAUCE**

#### **A. Material**

Es importante la observación de datos de materiales para la determinación de la rugosidad y condiciones actuales del cauce. En los trabajos de campo, se observó que el lecho de la defensa de Calana está compuesto por material fluvial en toda su longitud. Las paredes del margen izquierdo, al inicio del recorrido, son predominantemente arenas y gravas mal graduadas y un dique de enrocado en el margen derecho. En el tramo siguiente ambos diques son de muros de concreto y de piedra emboquillada formando una sección compuesta hasta llegar al puente en la carretera a Pachía. El puente está conformado de paredes y techo de concreto, luego del cual el encauzamiento es con gaviones por una longitud aproximada de 150.00 m para continuar su recorrido en terreno natural pasando por los distritos de Calana, Pocollay, Tacna, Gregorio Albarracín y finalmente a su desembocadura en el Océano Pacífico.

#### **B. Pendiente del cauce del río**

Con el levantamiento de campo, se obtuvo una pendiente del lecho, información que resultará básica para introducir al HEC RAS.

#### **3.4.4. ELECCIÓN DE MODELOS UNIDIMENSIONALES**

De los modelos unidimensionales disponibles de uso libre, se recurrió al empleo de HEC-RAS, que tiene una gran versatilidad para la simulación de flujo unidimensional a superficie libre. HEC-RAS (River Analysis System), desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (U.S. Army Corps of Engineers), es un software que permite la modelación hidráulica unidimensional de flujo permanente de canales naturales y artificiales a superficie libre. HEC-RAS.

En 1990, El Cuerpo de Ingenieros de USA (HEC) consciente del fenómeno creciente y de los avances del Sistema de Información Geográfica (GIS). La capacidad de obtener datos espaciales de Internet acoplados con los poderosos algoritmos en software y hardware hizo del GIS una herramienta muy atractiva para los proyectos de investigación referentes al agua. El proyecto del Buffalo Bayou demostró que el desarrollo del modelo hidrológico casi-distribuido en el HMS es práctico con la ayuda del software de GIS y los datos espaciales. HEC integró entonces las herramientas de GIS existentes con los programas desarrollados en dicho proyecto en un software de GIS llamado HEC GeoHMS. El desarrollo del software GeoHMS se llevó a cabo en cooperación con el Environment System Research Institute, Inc., a través de la Cooperative Research and Development Agreement (CRADA); y con la University of Texas en Austin (Frisancho, 2015).

#### **3.4.5. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO**

El modelo considera las propiedades geométricas y de rugosidad de los ríos ya mencionados (forma de secciones, trazado en planta, longitud entre secciones y coeficiente de rugosidad de Manning). Las secciones transversales, el perfil longitudinal y su ubicación en planta fueron obtenidas durante los trabajos de campo que se realizaron.

Como ya se mencionó, se ha usado como herramientas de la modelación el sistema de análisis de ríos HEC –RAS versión 5.0.3. Una de los factores para la elección del modelo fue la facilidad de su aprendizaje y la relación que existen entre el HEC-RAS y otros programas para compartir archivos de salida y entrada, además de permitir que la información procesada sea georreferenciada de acuerdo al sistema de coordenadas usado en el presente trabajo.

El modelo HEC – RAS calcula los perfiles de superficie de agua de una sección transversal a la próxima sección resolviendo con un proceso iterativo la ecuación de energía con un método estándar por etapas.

El periodo de retorno varía de acuerdo a las necesidades de diseño, así, se ha determinado los perfiles de superficie para periodos de retorno de 25, 50, 100 y 200 años.

#### **3.4.6. MATERIALES Y/O INSTRUMENTOS**

Para la ejecución de la investigación se utilizaron los siguientes:

- a) Materiales y equipos de campo
  - Estación total
  - Nivel topográfico
  - 01 mira topográfica
  - Equipo de G.P.S.
  - Cámara fotográfica
  - Wincha de lona 50.00 m.
  - Wincha metálica 8.00 m.
  - Libretas topográficas
  
- b) Materiales y equipos de gabinete
  - PC con procesador Core i7
  - Impresora a color
  - Memoria USB
  - Papel bond
  - Útiles de escritorio
  - Bibliografía necesaria
  
- c) Software
  - HEC RAS 5.0.3
  - AutoCAD Civil 3D
  - Google Earth
  - Microsoft Office Excel 2016
  - Microsoft Office Word 2016
  - Microsoft Office Power Point 2016

### 3.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Para elaborar el modelo hidráulico, se toma en cuenta los caudales máximos evaluados mediante el modelo de transformación logarítmica y métodos estadísticos, así como los ejes hidráulicos para la crecida correspondiente al periodo de retorno de 25, 50, 100 y 200 años. Para el desarrollo del modelo y cálculo de las características hidráulicas de la defensa Calana, se hicieron las visitas de campo a la zona del estudio, así como también estudios topográficos para establecer las características geométricas, pendientes longitudinales del fondo del cauce y propiedades del material de cauce y paredes.

Para la obtención del eje hidráulico, se utilizó imágenes satelitales del Google Earth y el software HEC-RAS v 5.0.3. Con estos datos, se ingresó al modelo hidráulico escogido. Los cálculos hidráulicos realizados con el programa HEC RAS comprendió lo siguiente:

- Modelamiento de la topografía del cauce y de sus características hidráulicas mediante la digitalización de las secciones transversales. La geometría de la sección transversal fue especificada conociendo distancia y cota de los puntos de interés hasta cubrir la sección del río comprendida entre sus márgenes.
- El ingreso de los coeficientes de pérdidas de energía que son utilizados en el programa para evaluar las pérdidas son:
  - El coeficiente de rugosidad de Manning “n”.
  - Los coeficientes de contracción y expansión.
- Luego se procedió a asignar los caudales de diseño.
- Finalmente, se ejecutó el HEC RAS para una condición de flujo permanente.

De acuerdo al seccionamiento proporcionado, se obtiene la geometría del cauce y secciones transversales, indicando las progresivas, las alturas de superficie, profundidad crítica y profundidad mínima para los diferentes periodos de retorno.



Con las secciones transversales y el coeficiente de rugosidad del cauce ingresados, el software HEC RAS determinará el nivel de agua máximo en cada sección para los periodos de retorno asignados (25, 50, 100 y 200 años). Las secciones transversales nos indican los niveles de agua alcanzados en cada una de ellas para poder observar la modelación y las distintas zonas donde el tirante de la avenida supere la corona de la defensa Calana y también para determinar posibles zonas críticas de inundación para las avenidas en los distintos periodos de retorno.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELAMIENTO

##### 4.1.1. DATOS GEOMÉTRICOS

Con el fin de crear el modelo hidráulico es necesario conocer las características geométricas de la defensa de Calana. Para un mejor entendimiento, se ha dividido las secciones por progresivas de acuerdo al siguiente esquema:



*Figura 4.* Vista satelital de la defensa Calana con el eje de cauce

Fuente: Google Earth

**Longitud:** 1.180 KM (tramo defensa de Calana hasta puente carretera Calana-Pachía).

**Pendiente Topográfica:** La pendiente topográfica promedio calculada en el cauce de la defensa de Calana es de 2.64%, el desnivel entre el punto de inicio y el tramo final es de 31.10m, siendo la longitud del tramo estudiado 1.180 Km.

**Secciones y materiales:** Actualmente, el lecho está compuesto por material fluvial en toda su amplitud con longitudes de ancho de fondo que varían de 20.00 m a 5.00 m en la sección del puente Calana - Pachía.



*Figura 5.* Material de fondo de cauce en la defensa de Calana. Se muestra el material del lecho de la defensa de Calana en la progresiva Km 0+000, se observa el dique enrocado en la margen derecha y el material del margen izquierdo

Desde la progresiva Km 0+000 hasta el Km 0+280, el margen derecho lo conforma un dique enrocado de aproximadamente 4.00 m. de altura y el margen izquierdo está conformado de arenas y gravas mal graduadas, el lecho tiene un ancho promedio de 20.00 m.

Desde la progresiva Km 0+280 a Km 0+560, ambos lados están compuestos por diques de enrocado de 4.00 m. de altura aproximadamente, el lecho tiene un ancho promedio de 20.00 m.



*Figura 6.* Dique Enrocado de la defensa de Calana progresiva Km 0+540

Desde la progresiva Km 0+560 a Km 0+910, ambos lados están compuestos por muros de concreto de una altura de 2.00 m aproximadamente, teniendo una sección de cauce rectangular, sobre los cuales hay arenas y gravas mal graduadas en ambos extremos. El lecho tiene un ancho promedio de 20.00 m y, gradualmente, va disminuyendo hasta la progresiva Km 0+910, en el que el ancho es de 8.00 m.



*Figura 7.* Inicio de sección de muros de concreto en la defensa de Calana. Aquí se observa la progresiva Km 0+560, donde se inicia el tramo con muros de concreto a ambos lados de la sección, también se ve el material del lecho.

Desde la progresiva Km 0+910 a Km a 0+930, los lados de la defensa corresponden a muros de concreto de una altura de 2.00 m aproximadamente, y, sobre el cual, pasa a ser una sección compuesta con taludes 1H: 1V de piedra emboquillada, con fondo de canal de 7.00m.



*Figura 8.* Inicio de sección compuesta en la defensa de Calana. Se observa el dique al margen derecho en la progresiva Km 0+940, fin sección de piedra emboquillada e inicio una sección de mampostería.

Desde la progresiva Km 0+930 hasta la progresiva Km 1+100, los lados de la defensa están conformados por muros de concreto armado con una sección rectangular, sobre los cuales se proyecta una sección trapezoidal con un talud de 1H:1V de mampostería de piedra y cemento y piedras emboquilladas. El fondo del canal tiene un ancho de 7.00 m.



*Figura 9.* Sección compuesta de la defensa de Calana  
Se observa el tipo de material de la defensa de Calana, mampostería y piedra emboquillada en la progresiva Km 0+940 a Km 1+100.

Desde la progresiva Km 1+100 a Km 1+130, ambos lados corresponden una sección trapezoidal de mampostería de piedra y cemento. El fondo del canal es de 8.50 m.

Desde la progresiva Km 1+130 hasta la progresiva 1+160, corresponde al puente de la carretera Calana, el cual tiene un ancho de 5.10 m y sus lados y techo corresponden a concreto.



*Figura 10.* Vista del puente de la carretera Pachia-Calana

Desde la progresiva Km 1+160 hasta la progresiva 1+180, tramo con gaviones a ambos lados del cauce.



*Figura 11.* Gaviones aguas abajo del puente de la carretera Pachia-Calana

#### 4.1.2. DATOS HIDRÁULICOS Y CONDICIONES DE CONTORNO

**Caudales máximos:** Los caudales máximos utilizados corresponden a periodos de retorno de 25, 50, 100 y 200 años, considerados la subcuenca Caplina y subcuenca Quebrada de Palca, siendo 39 m<sup>3</sup>/s, 61 m<sup>3</sup>/s y 94 m<sup>3</sup>/s y 147 m<sup>3</sup>/s, respectivamente (Frisancho, 2015). Asimismo, se estimará un caudal límite que puede soportar la estructura sin que presente desbordes o fallas.

**Tipo de flujo:** Se asume condiciones para flujo permanente, es decir, que, en la ecuación de la energía, no serán incluidos términos que dependan del tiempo. Y se considerarán cálculos a partir de un régimen supercrítico y subcrítico (mixto).

**Coefficiente de Manning:** Debido a la variedad de los materiales que conforman la defensa de Calana, se debe estimar una rugosidad compuesta. Los valores de *n* usados fueron extraídos de la tabla 1 “Valores del coeficiente de rugosidad *n*”, los cuales se resumen en la siguiente Tabla:

Tabla 7  
Valores de *n* usados para estimar la Rugosidad Compuesta

Descripción	<i>n</i>
Mampostería de piedra cementada	0.025
Concreto sin pulir	0.017
Piedra Suelta o Rip Rap	0.032
Fondo de Gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.040

Fuente: Chow (1994).

**Coefficientes de expansión y contracción:** Los coeficientes de contracción y expansión para flujo supercrítico y subcrítico usados en el modelamiento se observan en la siguiente tabla.

Tabla 8  
Valores para coeficiente contracción y expansión en flujo supercrítico

<b>Tipo de Transición</b>	<b>Valor de coeficiente de contracción</b>	<b>Valor de coeficiente de expansión</b>
Sin pérdidas	0.00	0.00
Transición gradual	0.01	0.03
Transición abrupta	0.05	0.20

Fuente: Hydrologic Engineering Center (2016).

Tabla 9  
Valores para coeficiente contracción y expansión en flujo subcrítico

<b>Tipo de transición</b>	<b>Valor de coeficiente de contracción</b>	<b>Valor de coeficiente de expansión</b>
Sin pérdidas	0.00	0.00
Transición gradual	0.1	0.3
Secciones de puentes típicos	0.3	0.5
Transición abrupta	0.6	0.8

Fuente: Hydrologic Engineering Center (2016).

## 4.2. ELABORACIÓN DE LA MODELACIÓN

Con la información para hacer el modelamiento ya definida, la construcción del modelo se da en etapas; para lo cual, se requiere las propiedades geométricas e hidráulicas (secciones transversales, trazado del eje del cauce, longitud entre secciones, coeficiente de rugosidad de Manning, coeficientes de contracción y expansión y condiciones de contorno). Las secciones transversales fueron obtenidas en el levantamiento de campo y su ubicación en planta fueron obtenidas con la ayuda de un GPS y de imágenes satelitales de Google Earth.

Las secciones transversales de la defensa de Calana introducidos al programa y procesados muestran como resultado las características de los perfiles hidráulicos calculados por el modelo, esto implica la visualización de tirantes de agua, velocidades de flujo, etc.



Es necesario indicar que la defensa de Calana es un encauzamiento artificial y su fallo podría ocasionar que el antiguo cauce del río se reactive, el mismo que pasaba por la Avenida Augusto B. Leguía con dirección al cuartel Gregorio Albarracín.

El diseño hidrológico para obras de control de agua está relacionado directamente con eventos extremos de corta duración como los caudales picos instantáneos y, debido a que su probabilidad es desconocida, se usan estimaciones basadas en probabilidades. Los criterios para el diseño para estructuras de control de agua para diques alrededor de ciudades tienen un periodo de retorno de 50-200 años. Y para efectos de toma de gestión de las planicies de inundación la U.S. Federal Emergency Management Agency (FEMA) ha optado la creciente de 100 años como base (Chow, Maidment y Mays, 1994).

#### **4.3. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN**

El análisis del modelo se determinó para los caudales máximos de 25, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno. Los resultados del modelo se presentan en forma gráfica y en tablas; por origen del programa, estos se presentan en idioma inglés. Los resultados se muestran en los anexos por cada uno de los periodos analizados.

En todos los periodos desarrollados, el régimen de flujo, en casi todo el tramo, se caracteriza por ser supercrítico, con número de Froude  $> 1$ , existe un tramo crítico entre la progresiva Km 1+060 a progresiva Km 1+130 (inicio del puente carretera Calana-Pachía), donde el flujo es subcrítico, siendo esta última progresiva un punto de transición entre los regímenes subcrítico y supercrítico.

En la tabla 10, se presenta las velocidades para los periodos de retorno de 25, 50, 100 y 200 años, los valores máximos corresponden a secciones con regímenes supercríticos y los valores mínimos a secciones con regímenes subcríticos.

Tabla 10  
*Velocidades según modelación hidráulica en la defensa Calana para cada periodo de retorno estudiado*

Periodo de Retorno	Velocidad máxima	Velocidad mínima
Años	(m/s)	(m/s)
25	5.43	1.40
50	6.07	1.34
100	6.56	1.31
200	8.03	1.29

#### 4.3.1. EJE DEL CAUCE DE LA DEFENSA CALANA

En la Figura 12, se puede observar el eje del cauce ingresado en el modelo hidráulico HEC-RAS. En los anexos se muestran los perfiles de los flujos ingresados y su resultado para todas las condiciones de caudales máximos instantáneos estudiados.

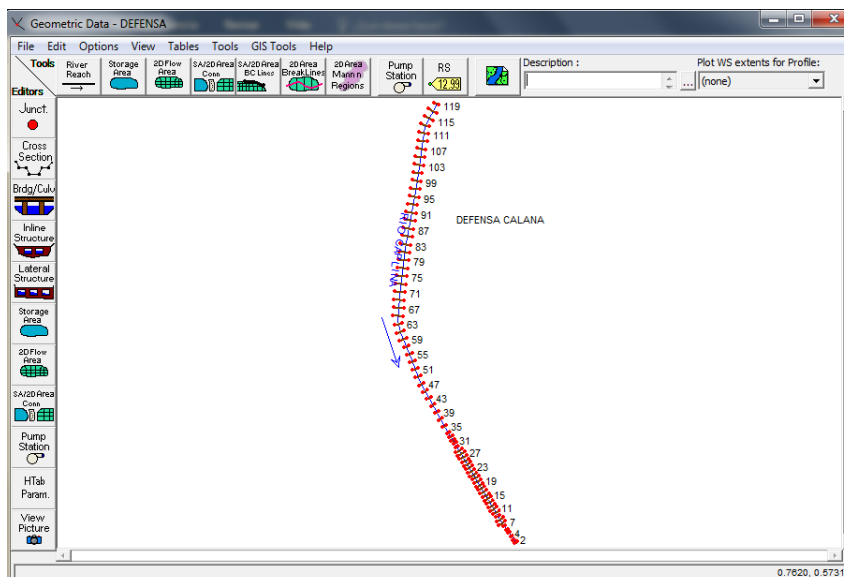


Figura 12. Vista del modelo del eje de cauce en HEC RAS

### 4.3.2. SECCIONES TRANSVERSALES

Las secciones transversales introducidas al HEC RAS, luego de ser procesadas muestran los perfiles hidráulicos calculados por el modelamiento, se pueden visualizar tirante de agua, velocidades de flujo, etc. para cada periodo de retorno estudiado. El punto más crítico se presenta en la progresiva Km 1+130 y Km 1+120, como se ve en la figura 13 y 14 respectivamente; que corresponde al cambio de sección entre la defensa de Calana y el puente de la carretera Calana-Pachía, que viene a formar un “embudo” en dónde el flujo pasa a ser subcrítico.

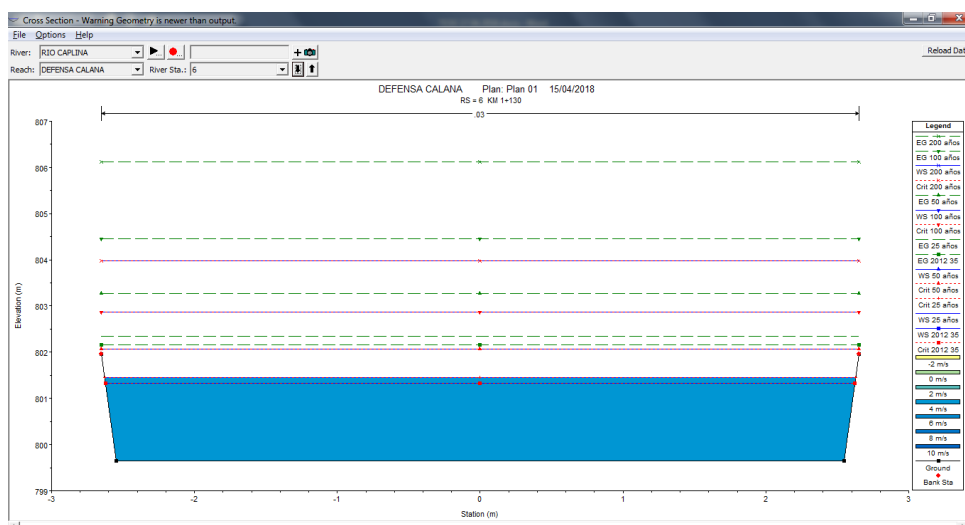


Figura 13. Sección transversal para los periodos de retorno 25, 50, 100 y 200 años en la progresiva Km 1+130 (puente Calana-Pachía).

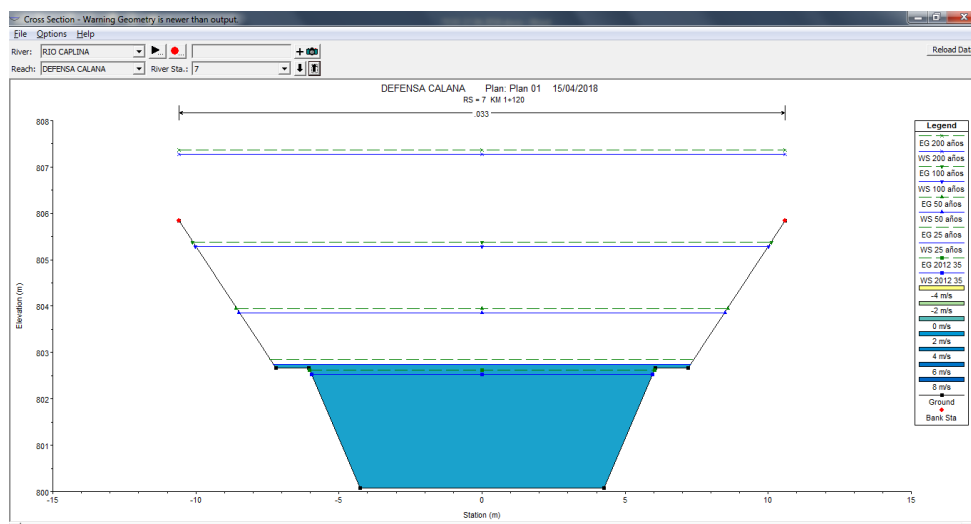


Figura 14. Sección transversal para los periodos de retorno 25, 50, 100 y 200 años en la progresiva Km 1+120

A continuación, las figuras 15, 16, 17 y 18 muestran los resultados correspondientes a los periodos de retorno de 25, 50, 100 y 200 años, respectivamente para la progresiva Km 1+120. La sección en la progresiva Km 1+130 corresponde al puente Calana-Pachia, se pueden observar velocidades de entre 4.19 m/s a 6.48 m/s, los cuales son valores altos con gran capacidad de erosión y arrastre de sedimentos

Plan: Plan 01 RIO CAPLINA DEFENSA CALANA RS: 7 Profile: 25 años					
E.G. Elev (m)	802.85	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.10	Wt. n-Val.		0.033	
W.S. Elev (m)	802.75	Reach Len. (m)	10.00	10.00	10.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		27.91	
E.G. Slope (m/m)	0.001130	Area (m2)		27.91	
Q Total (m3/s)	39.00	Flow (m3/s)		39.00	
Top Width (m)	14.61	Top Width (m)		14.61	
Vel Total (m/s)	1.40	Avg. Vel. (m/s)		1.40	
Max Chl Dpth (m)	2.67	Hydr. Depth (m)		1.91	
Conv. Total (m3/s)	1160.3	Conv. (m3/s)		1160.3	
Length Wtd. (m)	10.00	Wetted Per. (m)		17.37	
Min Ch El (m)	800.08	Shear (N/m2)		17.80	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)		24.88	
Frctn Loss (m)	0.03	Cum Volume (1000 m3)		0.59	
C & E Loss (m)	0.48	Cum SA (1000 m2)		0.37	

Figura 15. Características hidráulicas del flujo a T=25 años

Plan: Plan 01 RIO CAPLINA DEFENSA CALANA RS: 7 Profile: 50 años					
E.G. Elev (m)	803.95	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.09	Wt. n-Val.		0.033	
W.S. Elev (m)	803.86	Reach Len. (m)	10.00	10.00	10.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		45.39	
E.G. Slope (m/m)	0.000686	Area (m2)		45.39	
Q Total (m3/s)	61.00	Flow (m3/s)		61.00	
Top Width (m)	16.97	Top Width (m)		16.97	
Vel Total (m/s)	1.34	Avg. Vel. (m/s)		1.34	
Max Chl Dpth (m)	3.78	Hydr. Depth (m)		2.67	
Conv. Total (m3/s)	2328.6	Conv. (m3/s)		2328.6	
Length Wtd. (m)	10.00	Wetted Per. (m)		20.60	
Min Ch El (m)	800.08	Shear (N/m2)		14.83	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)		19.93	
Frctn Loss (m)	0.02	Cum Volume (1000 m3)		0.88	
C & E Loss (m)	0.66	Cum SA (1000 m2)		0.43	

Figura 16. Características hidráulicas del flujo a T=50 años

Cross Section Output				
File Type Options Help				
River:	RIO CAPLINA	Profile:	100 años	
Reach:	DEFENSA CALANA	RS:	7	Plan: Plan 01
Plan: Plan 01 RIO CAPLINA DEFENSA CALANA RS: 7 Profile: 100 años				
E.G. Elev (m)	805.38	Element	Left OB	Channel
Vel Head (m)	0.09	Wt. n-Val.		0.033
W.S. Elev (m)	805.29	Reach Len. (m)	10.00	10.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		71.91
E.G. Slope (m/m)	0.000450	Area (m2)		71.91
Q Total (m3/s)	94.00	Flow (m3/s)		94.00
Top Width (m)	20.03	Top Width (m)		20.03
Vel Total (m/s)	1.31	Avg. Vel. (m/s)		1.31
Max Chl Dpth (m)	5.21	Hydr. Depth (m)		3.59
Conv. Total (m3/s)	4432.2	Conv. (m3/s)		4432.2
Length Wtd. (m)	10.00	Wetted Per. (m)		24.79
Min Ch El (m)	800.08	Shear (N/m2)		12.79
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)		16.72
Frctn Loss (m)	0.01	Cum Volume (1000 m3)		1.20
C & E Loss (m)	0.90	Cum SA (1000 m2)		0.45

Figura 17. Características hidráulicas del flujo a T=100 años

Cross Section Output				
File Type Options Help				
River:	RIO CAPLINA	Profile:	200 años	
Reach:	DEFENSA CALANA	RS:	7	Plan: Plan 01
Plan: Plan 01 RIO CAPLINA DEFENSA CALANA RS: 7 Profile: 200 años				
E.G. Elev (m)	807.36	Element	Left OB	Channel
Vel Head (m)	0.09	Wt. n-Val.		0.033
W.S. Elev (m)	807.28	Reach Len. (m)	10.00	10.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		113.69
E.G. Slope (m/m)	0.000298	Area (m2)		113.69
Q Total (m3/s)	147.00	Flow (m3/s)		147.00
Top Width (m)	21.20	Top Width (m)		21.20
Vel Total (m/s)	1.29	Avg. Vel. (m/s)		1.29
Max Chl Dpth (m)	7.20	Hydr. Depth (m)		5.36
Conv. Total (m3/s)	8512.9	Conv. (m3/s)		8512.9
Length Wtd. (m)	10.00	Wetted Per. (m)		29.27
Min Ch El (m)	800.08	Shear (N/m2)		11.36
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)		14.68
Frctn Loss (m)	0.01	Cum Volume (1000 m3)		1.71
C & E Loss (m)	1.23	Cum SA (1000 m2)		0.45

Figura 18. Características hidráulicas del flujo a T=200 años

#### 4.3.3. PERFIL LONGITUDINAL

HEC RAS tiene la capacidad de mostrar los perfiles longitudinales con la pendiente del cauce, el tirante de agua y los límites de la defensa. En la Figura 19 se muestra que, para un periodo de 100 años en la sección crítica, ya se presenta condiciones de desborde que puede conllevar a inundaciones. Los perfiles longitudinales de todos los periodos de retorno se muestran en los anexos.

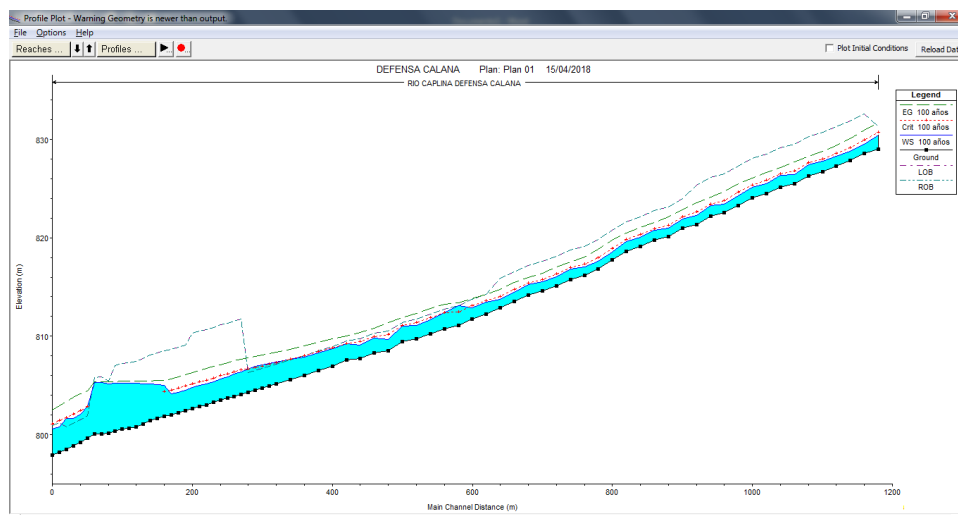


Figura 19. Perfil Longitudinal de la defensa de Calana

Se puede observar que antes de llegar al puente Calana-Pachía para 100 años de periodo de retorno los niveles del tirante tienden a igualar y superar la altura de la corona del dique.

#### 4.3.4. VISTA TRIDIMENSIONAL

HEC RAS también genera una vista en perspectiva tridimensional, permite observar el tramo estudiado con mayor detalle. La figura 20, muestra el tirante de agua respecto a la corona de la defensa para un periodo de retorno de 100 años.

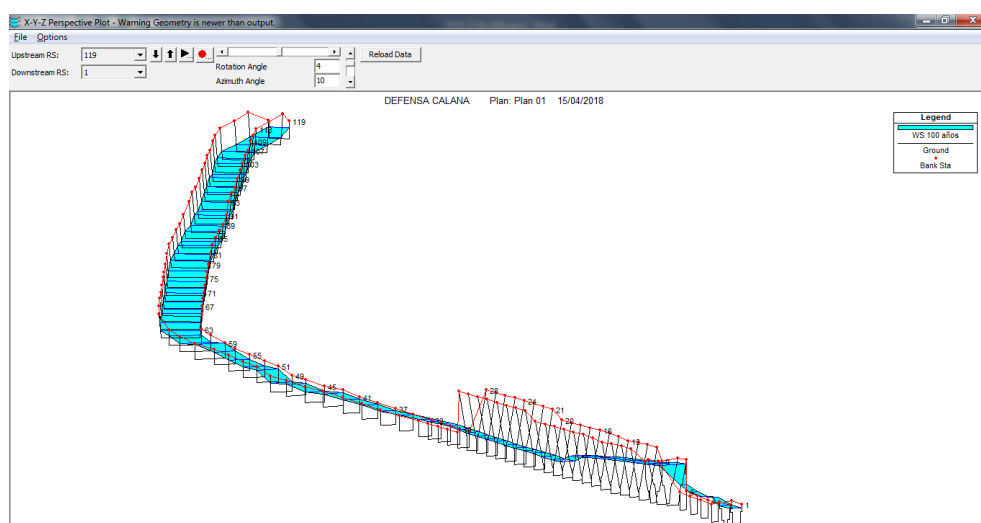


Figura 20. Perspectiva tridimensional de la defensa de Calana

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN

Con los resultados de modelamiento, en este capítulo se plantean cuatro escenarios para periodos de retorno ( $T_r$ ) de 25, 50, 100 y 200 años, identificando puntos críticos de desborde, magnitud de avenidas y velocidades de flujo. También se analiza la información periodística de avenidas importantes en el tramo estudiado.

#### 5.1. PRIMER ESCENARIO $T_r= 25$ años-CAUDAL $39 \text{ m}^3/\text{s}$

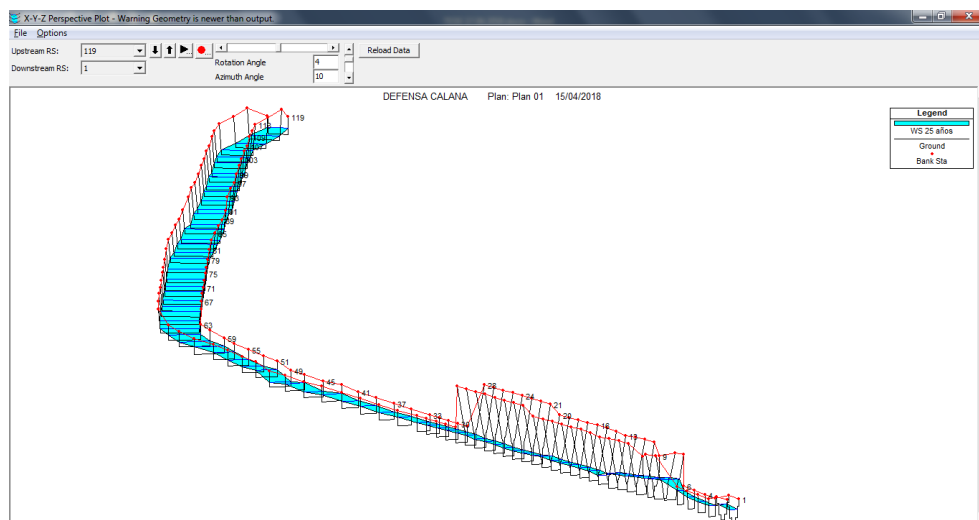


Figura 21. Vista 3D con caudal de  $39 \text{ m}^3/\text{s}$

En el primer escenario, las secciones muestran que no habrá desbordes en el recorrido de la defensa. Sin embargo, se puede apreciar que existe una zona donde el flujo pasa de ser supercrítico  $N^{\circ}\text{Froude} > 1$ , a subcrítico  $N^{\circ}\text{Froude} < 1$  (Km 1+060 a Km 1+120), metros más arriba del puente carretera Calana-Pachía. El resultado del modelo indica que flujo transcurre antes del ingreso al puente con un tirante superior al techo del canal de  $0.797 \text{ m}$ ., mientras que en el canal el tirante de agua fluye por debajo de puente a  $0.50 \text{ m}$ .

Las velocidades máximas de todo el tramo no sobrepasan los  $5.43 \text{ m/s}$  y las mínimas alcanzan el  $1.40 \text{ m/s}$ . Estas velocidades sobrepasan las mínimas permisibles o no

sedimentantes, que, para ríos con porcentaje pequeño de limos, varía entre 0.6 m/s y 0.9 m/s (Chow, 1994). Sin embargo, se consideran altamente erosivas, debido a su velocidad, presencia de sólidos y pendiente.

## 5.2. SEGUNDO ESCENARIO $T_r= 50$ años-CAUDAL $61 \text{ m}^3/\text{s}$

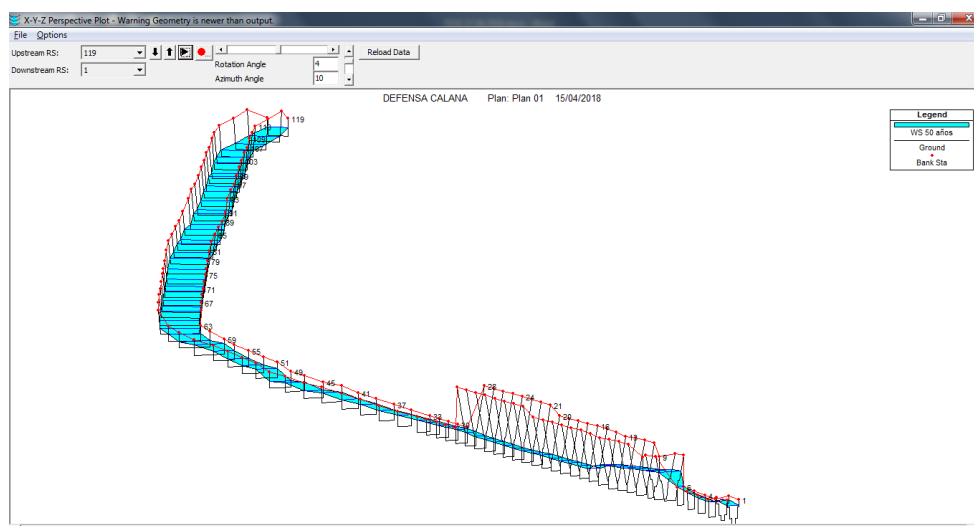


Figura 22. Vista 3D con caudal de  $61 \text{ m}^3/\text{s}$

En el segundo escenario, las secciones muestran que el tirante de agua no sobrepasa la corona de la defensa. Sin embargo, en las progresivas Km 0+840 a Km 0+900, el tirante se aproxima a la corona en un promedio de 0.40 m. en la sección de muros de concreto; en dicho tramo sobre los muros de concreto, existe material de arenas y gravas, las cuales se deberán reforzar.

En la sección del puente progresiva Km 1+130, observamos que dicha sección está a su total capacidad de diseño, por lo que se puede considerar que con un caudal de  $51 \text{ m}^3/\text{s}$ , es el límite que puede transportar la sección hidráulica para fluir a tirante lleno.

Considerando la tabla 3, los valores máximos recomendados de riesgo admisible de obras de drenaje es de  $R=25\%$  para obras de defensa ribereña y puentes, así también la vida útil para ambos casos es de  $n= 40$  años (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011). Aplicando la siguiente fórmula:



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

Se Obtiene un T=139 años. Sin embargo, de los resultados obtenidos de la modelación hidráulica, se observa que en el puente con un periodo de retorno de 50 años llega a su máxima capacidad, por lo que se generaría fallas en las estructuras.

Así como en el primer escenario, aquí se puede apreciar que existe una zona donde el flujo pasa de ser supercrítico  $N^{\circ}\text{Froude} > 1$  a subcrítico  $N^{\circ}\text{Froude} < 1$  (Km 1+050 a Km 1+120), metros más arriba del puente carretera Calana-Pachía. El modelo indica que, en el puente, el tirante de agua se proyecta a 0.12 m sobre el techo del puente y, pasando este, entrega al flujo al 85% de la capacidad del canal de gaviones (progresiva Km 1+160 en adelante).

Las velocidades máximas de todo el tramo no sobrepasan los 6.07 m/s y las mínimas alcanzan el 1.34 m/s. Una vez más, las velocidades sobrepasan las mínimas permisibles y tienen mayor capacidad de erosión por su incremento de velocidades.

### 5.3. TERCER ESCENARIO $T_r = 100$ años-CAUDAL $94 \text{ m}^3/\text{s}$

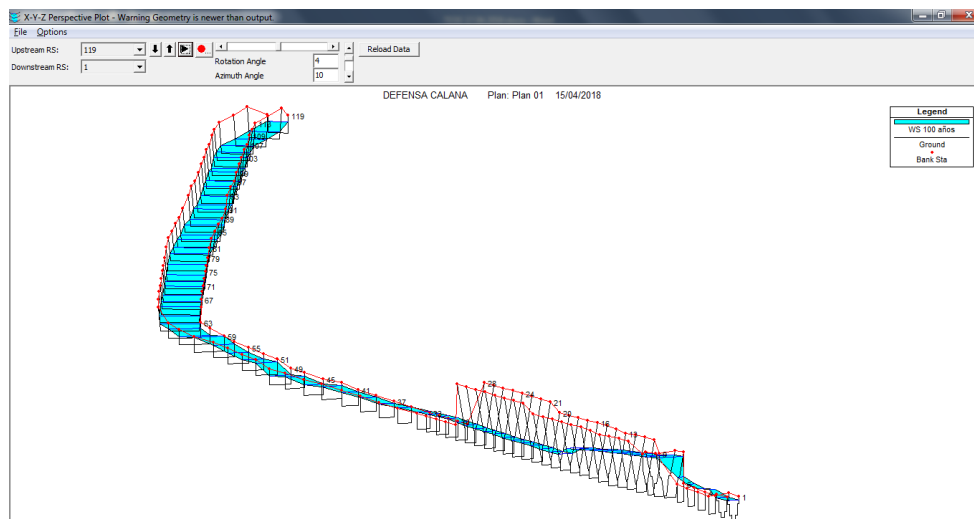


Figura 23. Vista 3D con caudal de  $94 \text{ m}^3/\text{s}$

En el tercer escenario, para un periodo de retorno de 100 años, los tirantes de agua ya sobrepasan la corona de la defensa de Calana desde la progresiva Km 0+840 a Km 0+920. En la figura 23, se aprecia que el modelamiento muestra una

zona crítica de desborde en las progresivas indicadas, el cual derivará en inundaciones en las zonas colindantes.

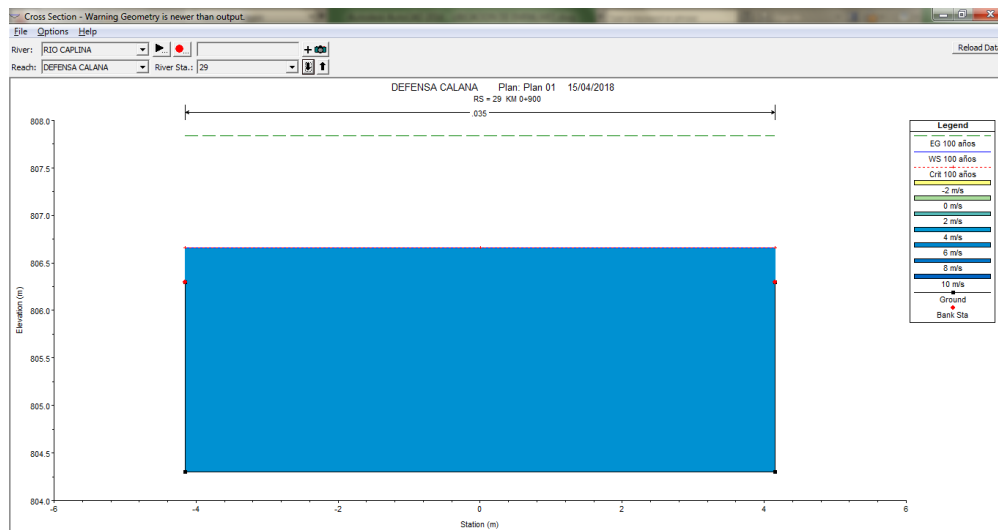


Figura 24. Sección hidráulica en la progresiva Km 0+900

En las progresivas Km 1+110 a 1+120, el tirante está por debajo de la corona de la defensa aproximadamente a 0.50m.

Se puede apreciar que existe una zona donde el flujo pasa de ser supercrítico  $N^{\circ}Froude > 1$ , a subcrítico  $N^{\circ}Froude < 1$  (Km 1+030 a Km 1+120), aguas arriba del puente carretera Calana-Pachía.

En la sección del puente Calana-Pachía, la capacidad de conducción ya se ve superada por el caudal, entrega el flujo al 90% de la capacidad del canal revestido de gaviones (Km 1+180).

Las velocidades máximas de todo el tramo no sobrepasan los 6.56 m/s y las mínimas alcanzan el 1.31 m/s, siendo velocidades altamente erosivas.

#### 5.4. CUARTO ESCENARIO $T_r= 200$ años-CAUDAL $147 \text{ m}^3/\text{s}$

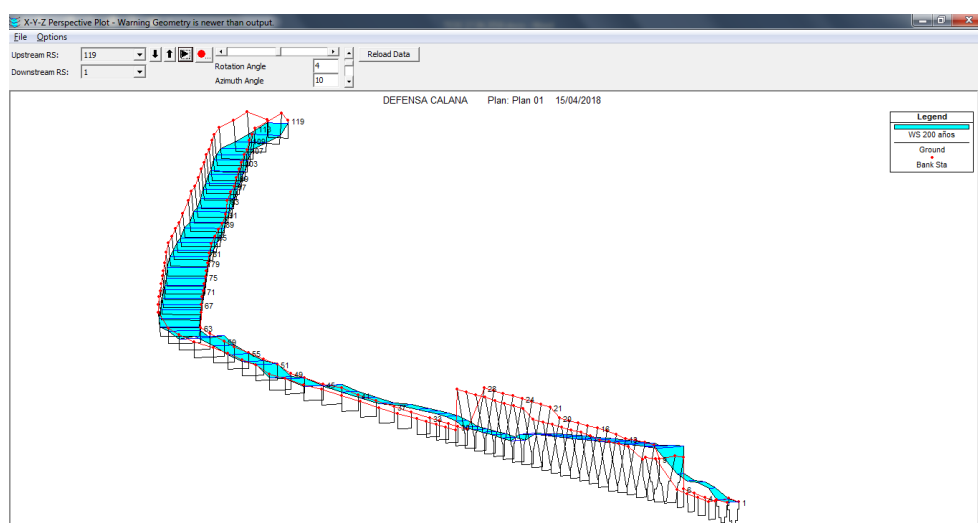


Figura 25. Vista 3D con caudal de  $147 \text{ m}^3/\text{s}$

En el cuarto escenario, para un periodo de retorno de 200 años, la capacidad de la defensa se ve afectada en varios tramos. De acuerdo a las secciones el tirante de agua, sobrepasa los muros de la defensa en los varios tramos comprendidos entre los Km 0+600 a 0+900, y del Km 1+080 a 1+180, es decir la sección de puente ya se encuentra sumergida.

Los regímenes subcríticos se pueden ver desde la progresiva Km 0+980 al Km 1+120 y en los tramos Km 0+840 a Km 0+890. Dichos incrementos de tirante ya producirían inundaciones y la falla de la estructura.

#### 5.5. VERIFICACIÓN DEL MODELO

Para la verificación del modelo, se planteó tomar un caudal histórico y conocido y simularlo bajo las mismas condiciones en que se presentó. Para ello, se revisó información de la prensa, encontrándose en versión digital de Radio Uno de Tacna, en febrero del 2012. Así también, en el Estudio hidrológico del río seco del sector Sobraya - Peschay (Municipalidad Distrital de Pocollay, 2012), hace referencia que el caudal registrado el 04 de Enero del 2012, fue de  $35 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## Incremento de caudal de río Caplina alarma a tacneños

Luego de reportarse intensas lluvias en la zona andina de la región, la noche de ayer un alarmante incremento del caudal del río Caplina que superó los 35 metros cúbicos por segundo, alertó a tacneños y movilizó a personal de Defensa Civil de los distritos por donde discurre este río.

Creado por: **Liliana Coronel**

Texto Imprimir

16 de febrero del 2012



Preocupante crecida de ríos movilizó a secretarías técnicas de distritos Calana, Pocollay y Gregorio Albarracín. Río Caplina alimenta a Arunta

Twitter Me gusta 3 Compartir

### Mas noticias

Carrillo a Vargas: espero que actúe con dignidad y personalidad

Tacna: Se reúnen en plaza Zela para protestar contra indulto a Alberto Fujimori

Denuncian irregularidades en la I.E Coronel Gregorio Albarracín

*Figura 26.* Publicación digital de avenida extrema en el río Caplina

Fuente: Portal de internet de Radio Uno-Tacna



*Figura 27.* Río Caplina-río Seco en puente Calana-Pachía

La vista fotográfica corresponde al 04 de Enero de 2012

Fuente: Municipalidad Distrital de Pocollay, (2012).

Se introdujo al modelo HEC-RAS un caudal de 35 m<sup>3</sup>/s obteniendo, en la misma zona del puente carretera Calana-Pachía, un resultado similar al real, como se observa en la figura 28.

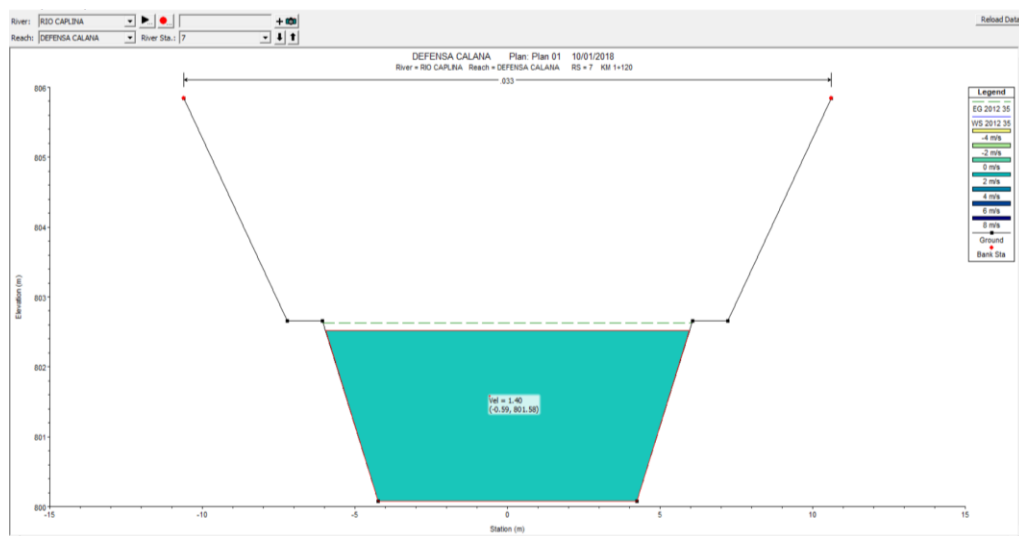


Figura 28. Sección hidráulica para un caudal de 35 m<sup>3</sup>/s

Luego, con el mismo caudal de 35 m<sup>3</sup>/s, como se aprecia en la figura 29, se obtuvo el siguiente perfil en la salida del puente carretera Calana-Pachía, que es también similar al tirante real en la fecha analizada.

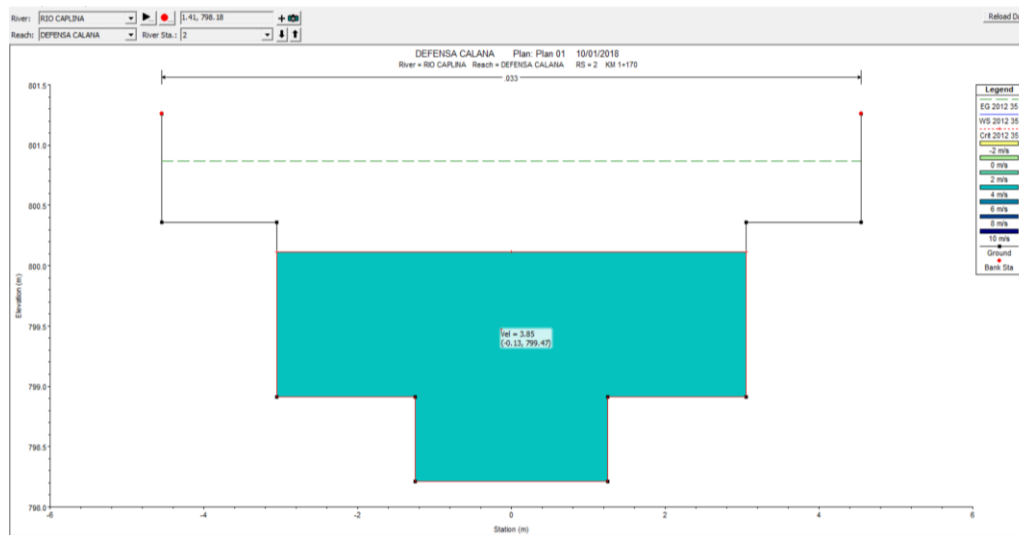


Figura 29. Sección aguas abajo del puente carretera Calana-Pachia



*Figura 30.* Río Caplina-río Seco antes de la zona de Sobraya  
Fuente: Municipalidad Distrital de Pocollay, (2012).

En la figura 30 se aprecia que la descarga máxima estimada por la Autoridad Local de Agua fue de 35 m<sup>3</sup>/s que corresponde a una crecida ocurrida el 04 de enero de 2012.

## CONCLUSIONES

- El modelamiento hidráulico se realizó con el software HEC RAS; para ello, se modeló con flujo permanente, con periodo de retorno de 25, 50, 100 y 200 años y con caudales de 39 m<sup>3</sup>/s, 61 m<sup>3</sup>/s y 94 m<sup>3</sup>/s y 147 m<sup>3</sup>/s respectivamente. De los resultados obtenidos, se ha determinado que existe una alta vulnerabilidad causada por el estrechamiento de la sección de la defensa de Calana en la sección del puente Calana-Pachía, progresiva Km 1+130 a Km 1+160.
- La simulación hidráulica ha podido establecer, con los caudales máximos de avenidas, los tramos críticos del cauce que serían propensos a desbordes e inundaciones, tal como se puede ver en las secciones hidráulicas del modelo. Los resultados indican que, con un caudal de 51 m<sup>3</sup>/s, la sección del puente Calana-Pachía trabaja a su máxima capacidad. Con un caudal de 94 m<sup>3</sup>/s, para un periodo de retorno de 100 años, se ha obtenido que los tirantes de agua sobrepasan la capacidad de la defensa de Calana, generando inundaciones en las zonas aledañas.
- El modelamiento hidráulico permitió identificar zonas críticas propensas a inundaciones, esto es una herramienta básica para planificar e identificar trabajos de mantenimiento y mejoramiento de la defensa de Calana, ya que es una estructura importante en la cabecera del valle de Tacna.
- Las velocidades de flujo obtenidas son elevadas, esto debido a la pendiente del lecho y también a las características propias del comportamiento hidrológico del río Caplina que tiene sus orígenes en áreas montañosas o de cordillera, con un flujo variable interanual y con caudales máximos en épocas de verano. Estas velocidades constituyen un agente erosivo de gran magnitud originando que las paredes de la defensa tengan una alta resistencia al flujo, es decir, tengan una alta rugosidad.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda a las autoridades encargadas tomar en cuenta el rediseño del puente de la carretera Calana-Pachía, considerando aspectos técnicos, normativos y criterios ingenieriles adecuados, ya que actualmente el puente de la carretera Calana-Pachía, se presenta como un embudo en la defensa de Calana, que reduce la sección de la defensa de forma abrupta. Los resultados del modelamiento, así como también las avenidas máximas observadas hasta la fecha, han comprobado que existe un alto riesgo de falla en esta zona debido a este estrechamiento de sección.
- Dada la importancia de la defensa de Calana es necesario plantear la ejecución de trabajos de reforzamiento y mantenimiento de la estructura a lo largo de su cauce, desde donde inicia la estructura hasta la zona de gaviones, considerando la información disponible del presente trabajo
- Se recomienda hacer estudios hidrológicos, hidráulicos y sociales de mayor precisión en las zonas críticas donde se ha determinado que pueden estar afectadas por inundaciones debidas al incremento del caudal en la defensa de Calana.
- Es necesario que las autoridades encargadas de los gobiernos locales ( Municipalidad Distrital de Calana, Municipalidad Distrital de Tacna y Gobierno Regional de Tacna), las instituciones (INDECI, ANA-ALA, PET, Ministerio de Agricultura) y otras involucradas que tengan injerencia directa o indirecta con las consecuencias que originaría el colapso de la defensa de Calana planteen mecanismos para realizar estudios y/o expedientes de obras, trabajos de limpieza de cauce, capacitación de los pobladores de las zonas colindantes a fin de tomar conciencia de producirse una inundación, planes de contingencia como alertas, movilización y respuesta frente a un evento extremo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcocer, V., Rodríguez, J., Bourguett, V., Llaguno, O., & Albornoz, P. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII(5), 33-55.
- Bardales, Y., & Concepción, L. (2014). *Modelamiento hidrológico e hidráulico aplicado al cálculo de socavamiento en puentes Potrero, ubicado en la carretera Chota-Bambamarca-Hualgayoc*. Tesis, Trujillo.
- Bladé, E. (2005). *Modelación de flujo en lámina libre sobre cauces naturales, análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones*. Tesis, Barcelona.
- Bladé, E., Sánchez, M., Juny, H., Sánchez, P., Niñerola, D., & Gómez, M. (2009). *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable - Una visión a partir del modelo HEC RAS*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Calderón, J. (2017). *Modelamiento geoespacial para la identificación de zonas críticas vulnerables a peligros múltiples, cuenca hidrográfica Camaná-Majes-Colca, Arequipa*. Tesis, Lima.
- Campos, D. (2017). Definición de tres épocas de crecientes utilizando estadísticos direccionales. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), 156.
- Cea, L., Bladé, E., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vasquez Cendón, E., . . . Coll, A. (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica de flujos en ríos. *Revista internacional de metodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 30(1), 1-10. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Chereque, W. (1987). *Mecánica de fluidos 2*. Lima: PUCP.
- Chow, V. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogota: McGraw-Hill.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Cuervo, A. (2012). *Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos*. Tesis, Barcelona.
- Díaz, J., García, M., Herrero, H., Heredia, A., López, F., Castelló, E., & Brarda, J. (2015). Caracterización experimental y numérica de eventos de crecida extraordinarios en la cuenca del río Carcarañá, Argentina. *Aqua-LAC*, 8(1), 10-20.
- Díez, A. (2004). *Geomorfología e hidrología fluvial del río Alberche*. Tesis, Madrid.

- Elías Castillo, F., & Ruiz Beltrán, L. (1979). *Precipitaciones máximas en España*. Madrid: Servicio de publicaciones, Ministerio de agricultura.
- Frisancho, F. (2015). *Análisis de vulnerabilidad mediante modelamiento hidrodinámico del cauce del río Seco del cono sur de la ciudad de Tacna*. Tesis, Tacna.
- Guarniz, C. (2014). *Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis de rotura en presas de materiales sueltos; y aplicación a la presa Palo Redondo*. Tesis, Trujillo.
- Hydrologic Engineering Center. (2016). *HEC-RAS, Hydraulic reference manual version 5.0*. Manual, California.
- INGEMMET. (2009). *Hidrogeología de la cuenca del río Caplina*. Boletín N°1 Serie H, Lima.
- INRENA-DGAS. (2002). *Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Caplina y Uchusuma*. Estudio hidrológico, Tacna.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2006). *Manual básico para la estimación del riesgo*. Manual, Lima.
- LLuén, W. (2015). *Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales en flujo de agua en ríos*. Tesis, Barcelona.
- López Cadenas del Llano, F., & Mintegui Aguirre, J. A. (1986). *Hidrología de superficie*. Madrid.
- Mamani, H. (2014). *Modelamiento de máximas avenidas que generan riesgo de inundación en la ciudad de Ayaviri-Puno*. Tesis, Puno.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2011). *Manual de diseño hidrología, hidráulica y drenaje del MTC*. Lima.
- Mintegui, J., Robrero, J., Huelin, P., & Gonzalo, C. (2010). Análisis de la adecuación de las acciones restauradoras efectuadas en el cono de sedimentación de un curso torrencial, ante la incidencia en el mismo de eventos extraordinarios durante el invierno de 2009-10. *Aqua-LAC*, 2(2), 62-77.
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería*. México D.F.: Alfaomega.
- Moya, V., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Application of 2D numerical simulation analysis of the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia Flood: Application of the new HEC RAS version 5. *RIBAGUA*, 3, 25-26.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001>
- Municipalidad Distrital de Pocollay. (2012). *Estudio Hidrológico del río Seco del sector Sobraya-Peschay*. Tacna.
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Glosario Hidrológico Mundial*. Ginebra: UNESCO.

- Pino, C. (2013). *Caracterización hidrogeomorfológica de la cuenca del río Caplina*. Tesis, Tacna.
- Quispe, J., & Sullca, R. (2015). *Aplicación del modelo matemático HEC RAS para el cálculo del perfil hidráulico del río Ramis*. Tesis, Puno.
- Rocha, A. (2007). *Hidráulica de tuberías y canales*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Sotelo, G. (1997). *Hidráulica general*. México D.F.: Limusa .
- Sotelo, G. (2002). *Hidráulica de canales*. México D.F.: UNAM Facultad de ingeniería.
- Torres, J., & Gómez, A. (2008). *Adaptación al cambio climático: de los fríos y los calores en los Andes*. Lima: Soluciones Prácticas-ITDG: Juan Torres, Anelí Gómez.
- Vásquez, A. (2016). *Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas*. Lima: UNALM.
- Velasquez, A. (2015). *Modelamiento Hidrológico e Hidráulico del Río Santa, Tramo Asentamiento Humano las Flores, Distrito de Carhuaz, Ancash*. Tesis, Lima.
- Vilcanqui, A. (2016). *Modelación hidrológica con fines de gestión de riberas en la cuenca del río Caplina-Tacna*. Tesis, Tacna.
- Villón, M. (2002). *Hidrología*. Lima: Villón.
- Villón, M. (2007). *Hidráulica de canales*. Lima: Villón.
- Yzocupe, V. (2006). Simulación de flujo 1D en canales abiertos. *Revista de investigación de Física*, 9(1), 7-16.

**ANEXOS**

**ANEXO 1.**  
**MATRIZ DE CONSISTENCIA**

## MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título de tesis : Modelación hidráulica de la defensa de Calana con el fin de determinar la vulnerabilidad ante máximas avenidas.

Docente Asesor : Ph.D. Edwin M. Pino Vargas

Especialidad : Hidráulica

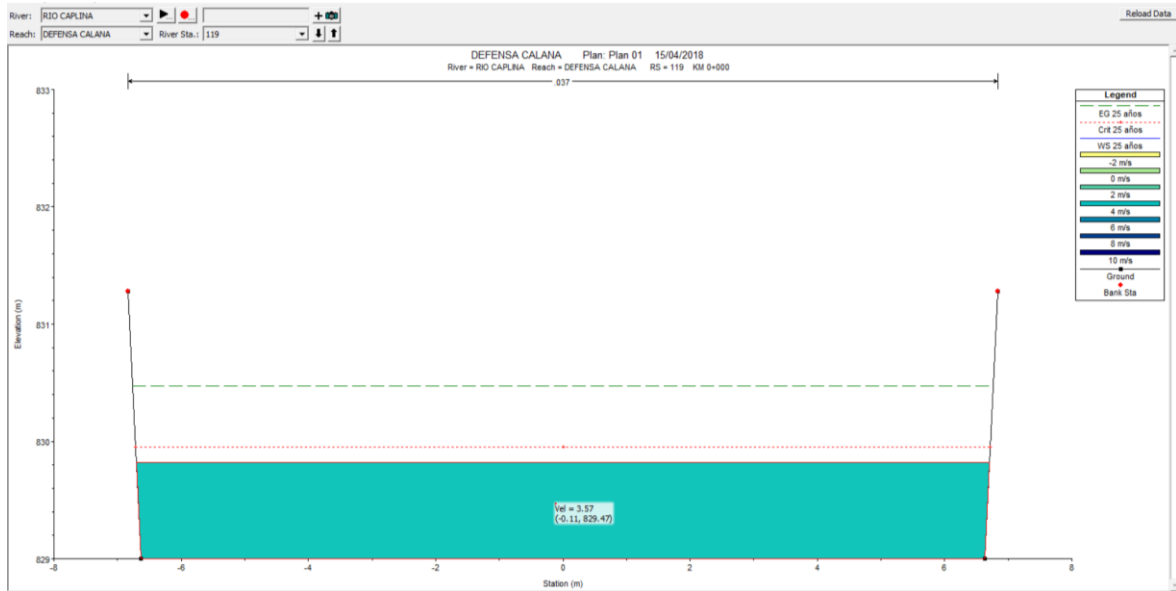
**Nota:** El modelo o el detalle para este caso (matriz de consistencia) se encuentra en la página 71 del manual de formulación de informe de tesis.

Planteamiento del problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Indicador	Método	Estadística
El propósito de este trabajo de investigación es evaluar la vulnerabilidad de la defensa de Calana ante caudales máximos mediante modelamiento hidráulico.	<p><b>Objetivo general</b></p> <p>Evaluar la vulnerabilidad de la defensa de Calana mediante modelación hidráulica.</p> <p><b>Objetivos específicos</b></p> <p>OE1) Conocer cuál es el caudal máximo que genera la falla hidráulica de la estructura existente.</p> <p>OE2) Realizar la modelación hidráulica con el software del HEC-RAS.</p> <p>OE3) Identificar las zonas colindantes a la defensa calana vulnerables por inundación o desborde debido a caudales extraordinarios.</p>	<p><b>Hipótesis general</b></p> <p>Es posible evaluar la vulnerabilidad de la Defensa de Calana mediante modelación hidráulica.</p> <p><b>Hipótesis específicas</b></p> <p>HE1) El análisis del marco teórico, información histórica y trabajo de campo permitirá identificar el caudal que genera la falla hidráulica.</p> <p>HE2) El modelamiento hidráulico permite estudiar la vulnerabilidad de la defensa de Calana ante máximas avenidas.</p> <p>HE3) El modelamiento hidráulico permitirá identificar las zonas colindantes a la defensa Calana vulnerable a inundación.</p>	<p><b>Dependiente</b></p> <p>Vulnerabilidad</p> <p><b>Independiente</b></p> <p>Modelación hidráulica.</p> <p>Parámetros físicos y morfológicos.</p>	<p>I1) Daño ocasionado a la infraestructura y zonas aledañas debido a la ocurrencia de máximas avenidas.</p> <p>I2) Resultados de cálculos hidráulicos de la modelación ante máximas avenidas.</p> <p>I3) Talud y base de canal, pendiente del cauce, velocidad de flujo, coeficiente de rugosidad, tipo de flujo de cauce.</p>	<p>M1) Tipo de investigación: descriptiva y experimental</p> <p>M2) Nivel de Investigación: Analítico-descriptivo</p> <p>M3) Diseño de la investigación: Experimental-descriptivo.</p> <p>M4) Población: Calana, Tacna.</p> <p>M5) Técnica de identificación y recolección de datos: Observación directa, levantamiento de datos en campo y archivos de consulta.</p>	Descriptiva

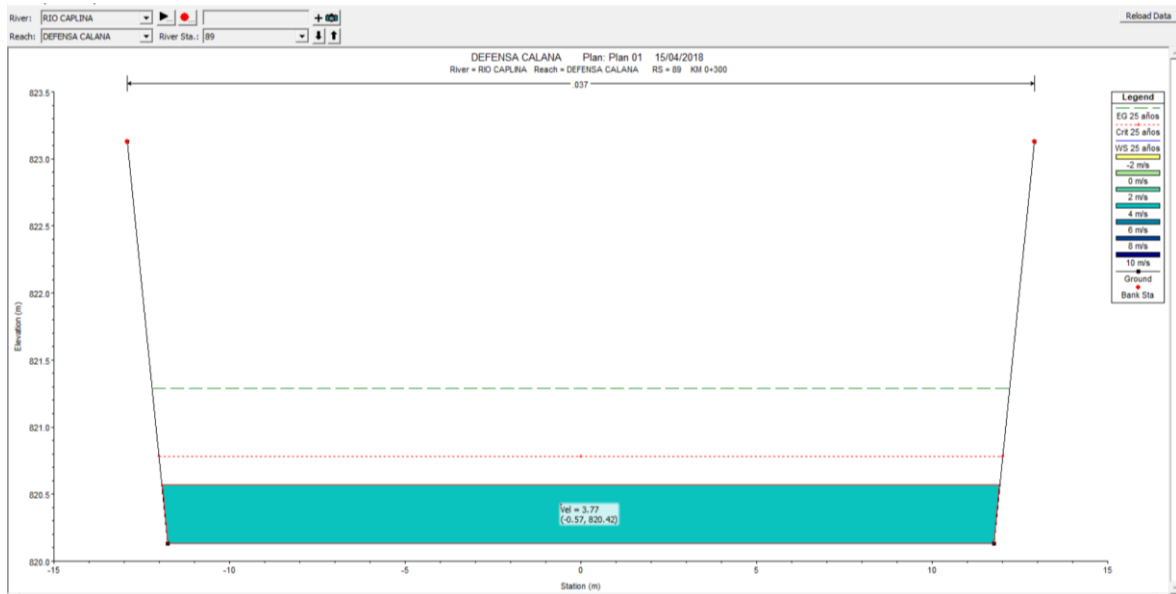
**ANEXO 2.**  
**SECCIONES HIDRÁULICAS**

## A. PARA PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS – $Q=39 \text{ m}^3/\text{s}$ :

✓ PROGRESIVA KM 0 + 000:

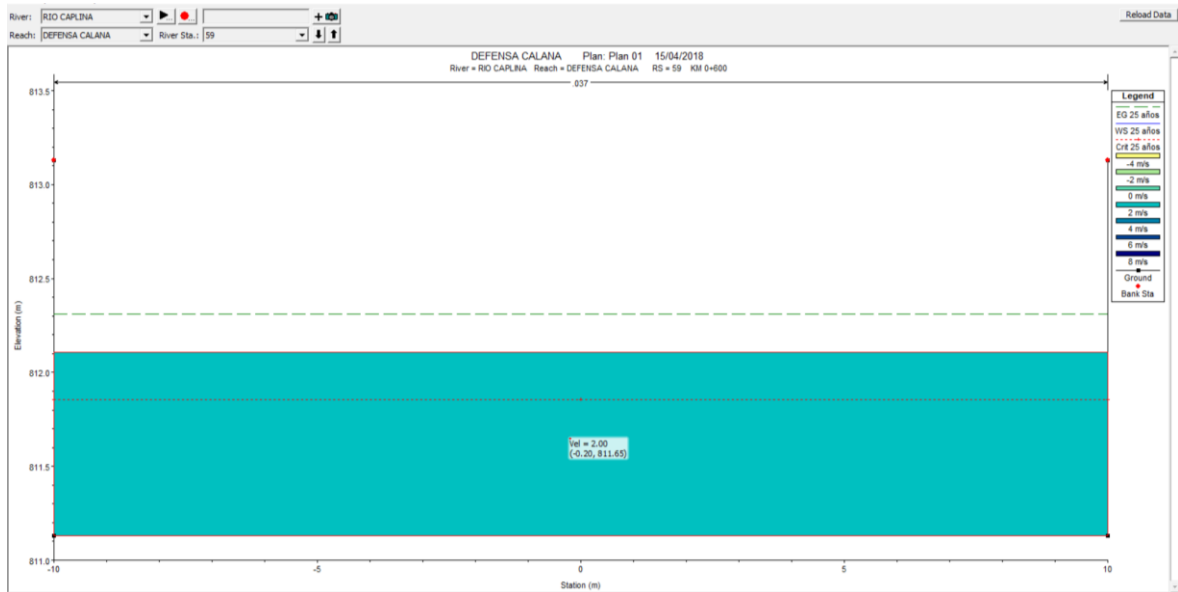


✓ PROGRESIVA KM 0 + 300:

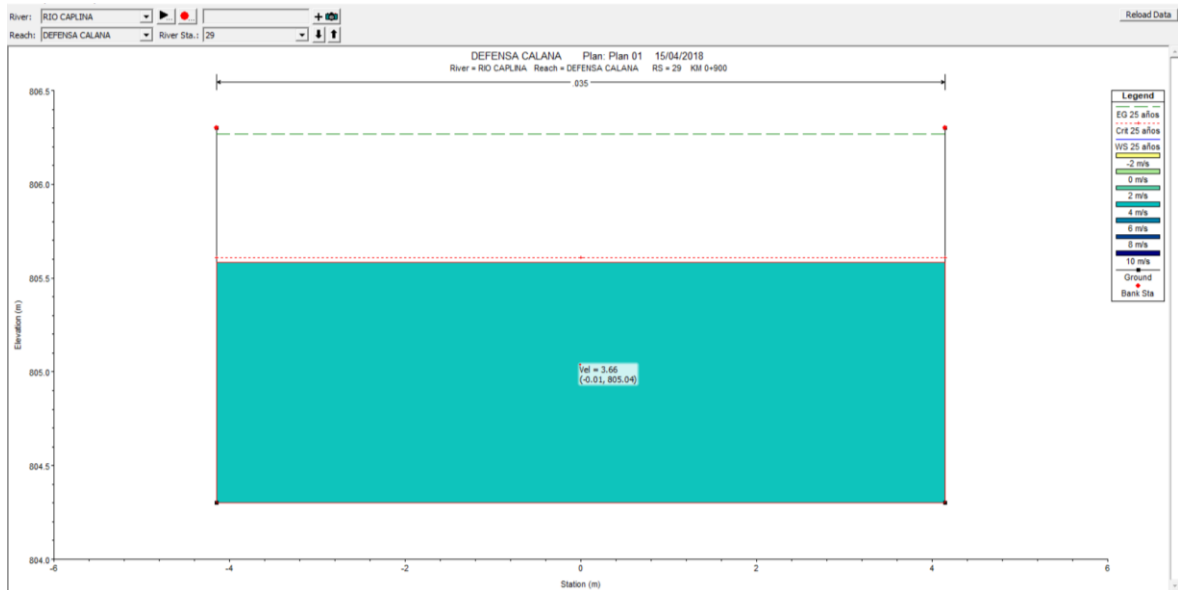




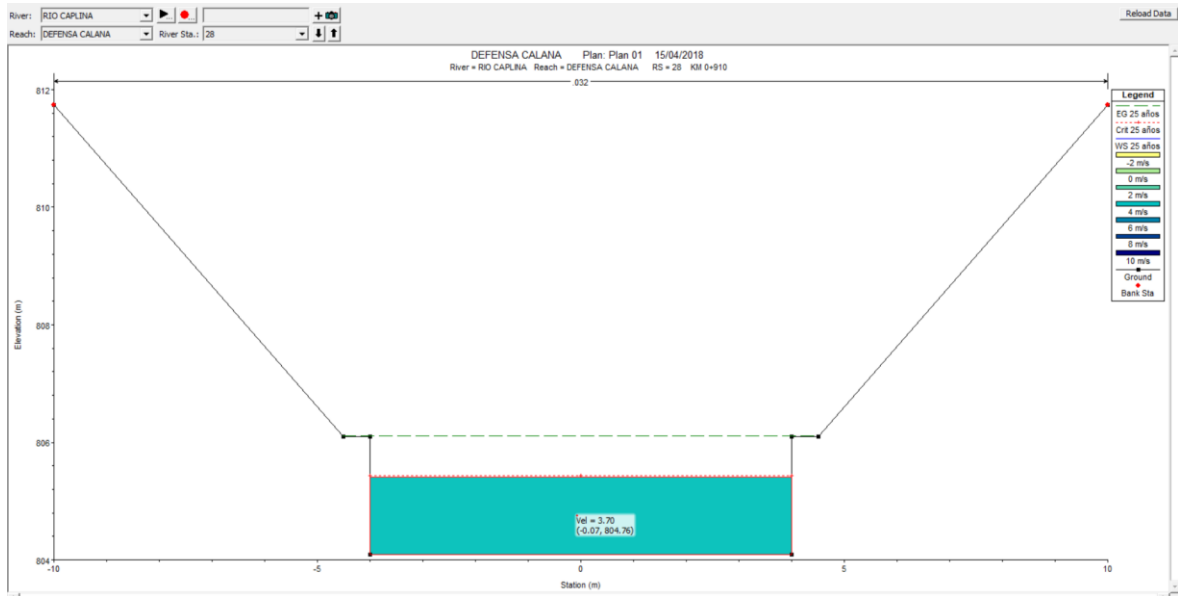
✓ PROGRESIVA KM 0 + 600:



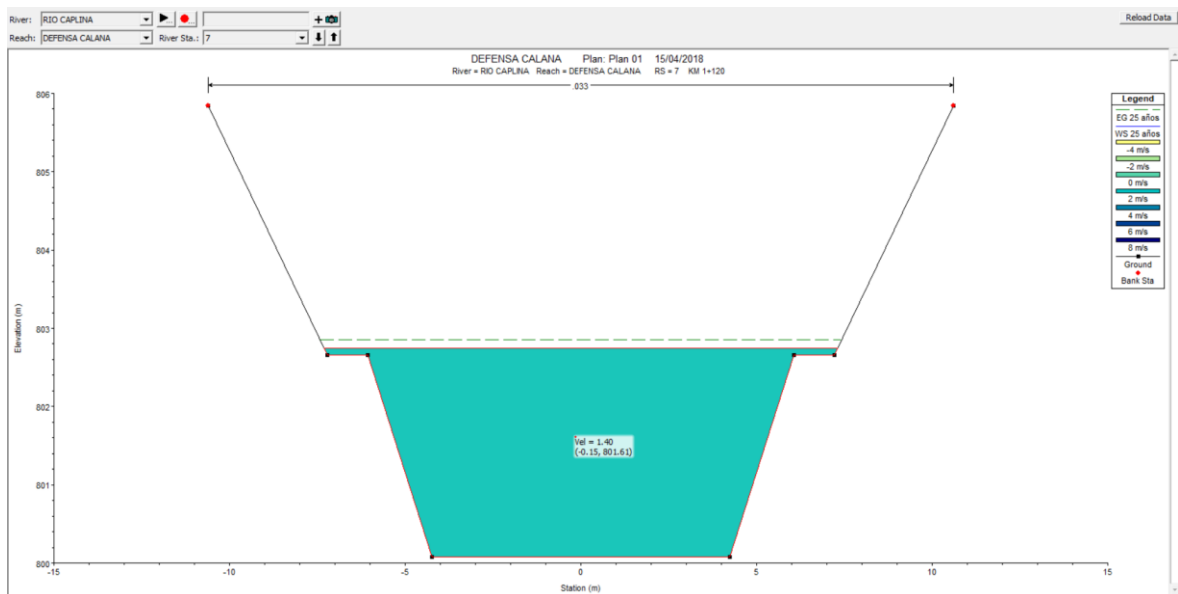
✓ PROGRESIVA KM 0 + 900:



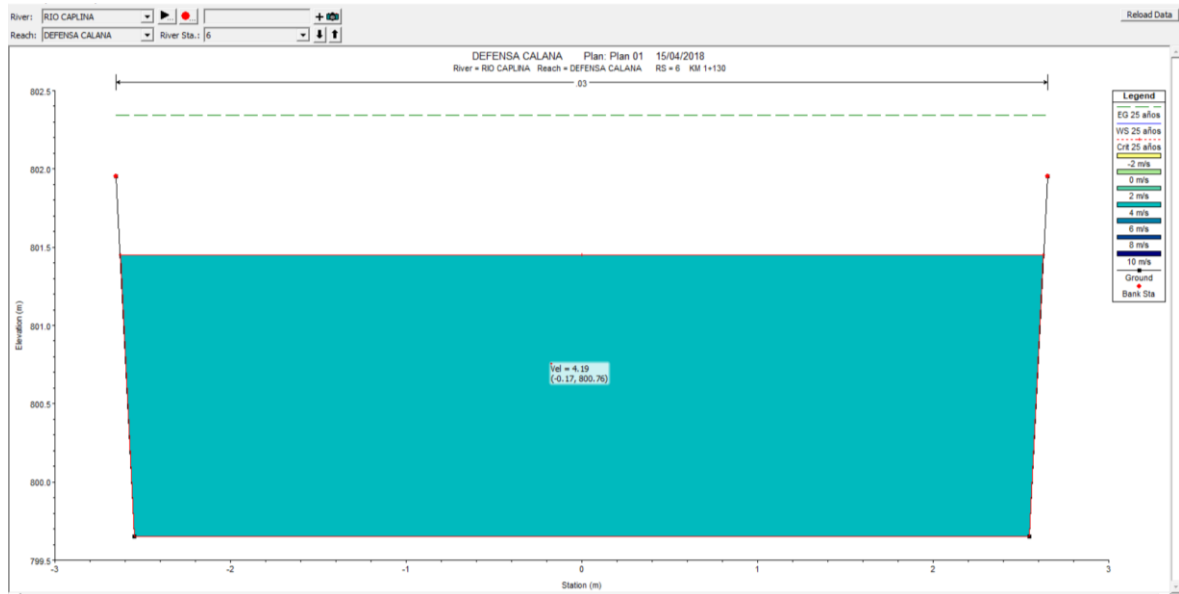
✓ PROGRESIVA KM 0 + 910:



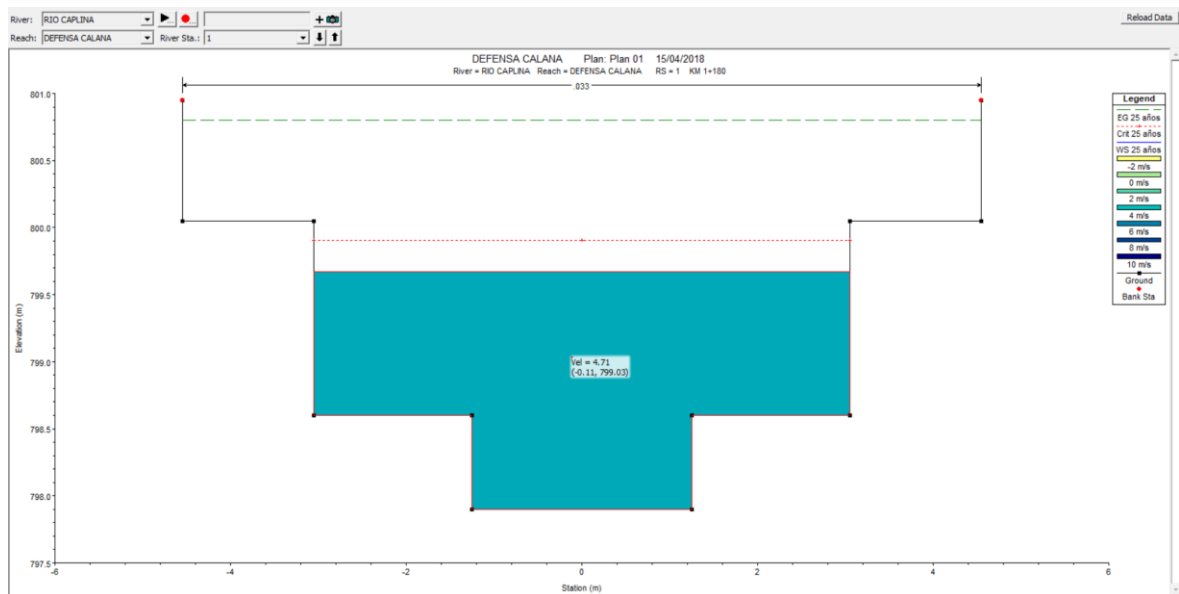
✓ PROGRESIVA KM 1 + 120:



✓ PROGRESIVA KM 1 + 130:

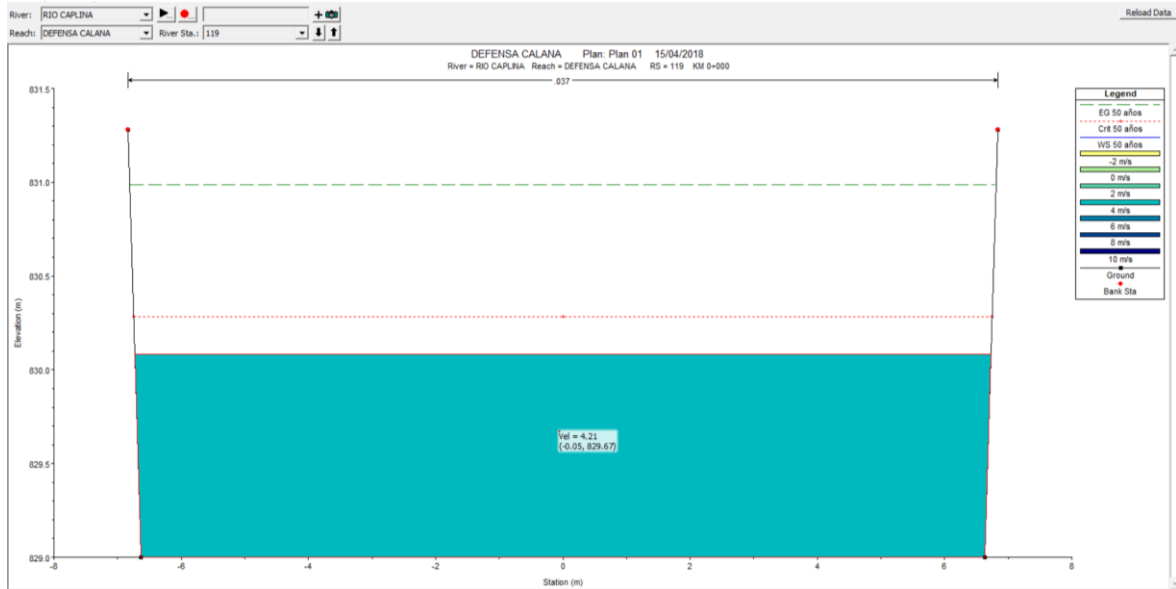


✓ PROGRESIVA KM 1 + 180:

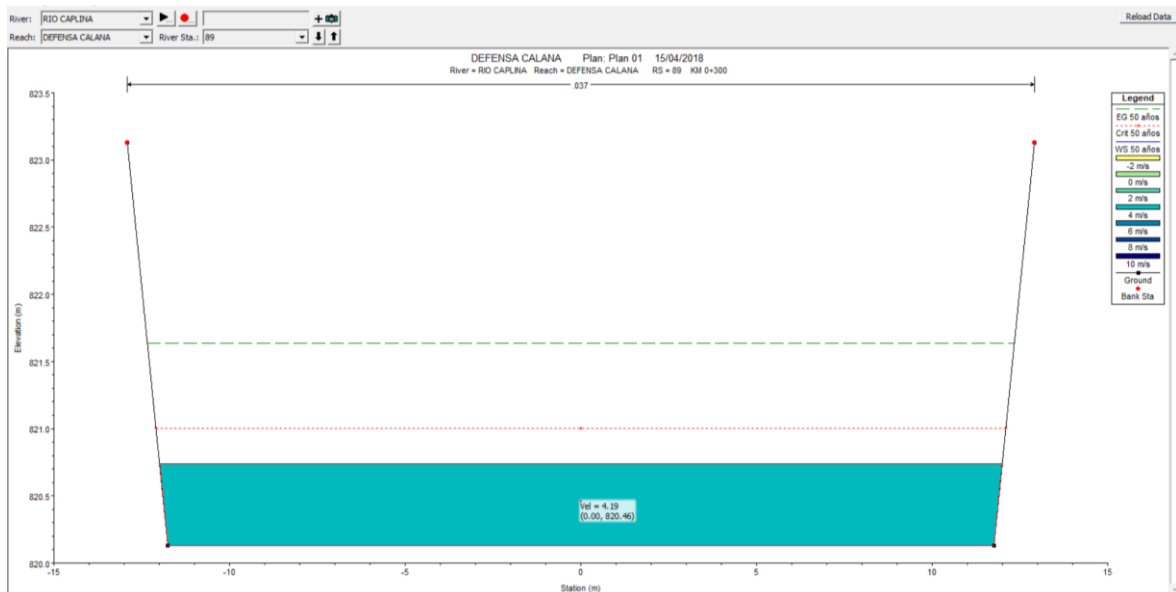


## B. PARA PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS – Q=61 m<sup>3</sup>/s:

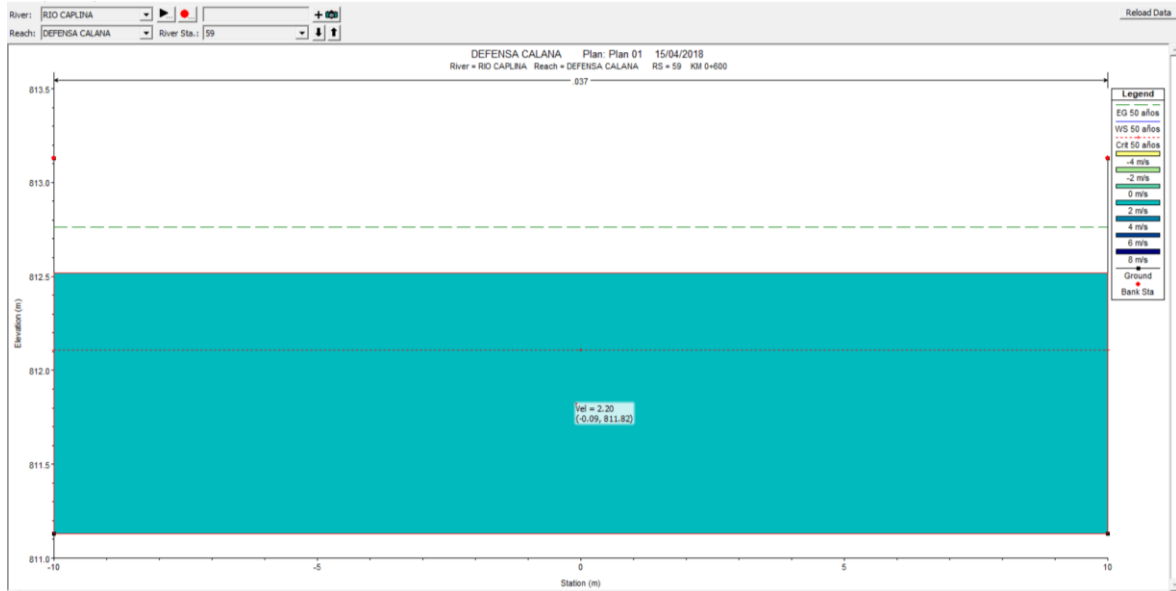
✓ PROGRESIVA KM 0 + 000:



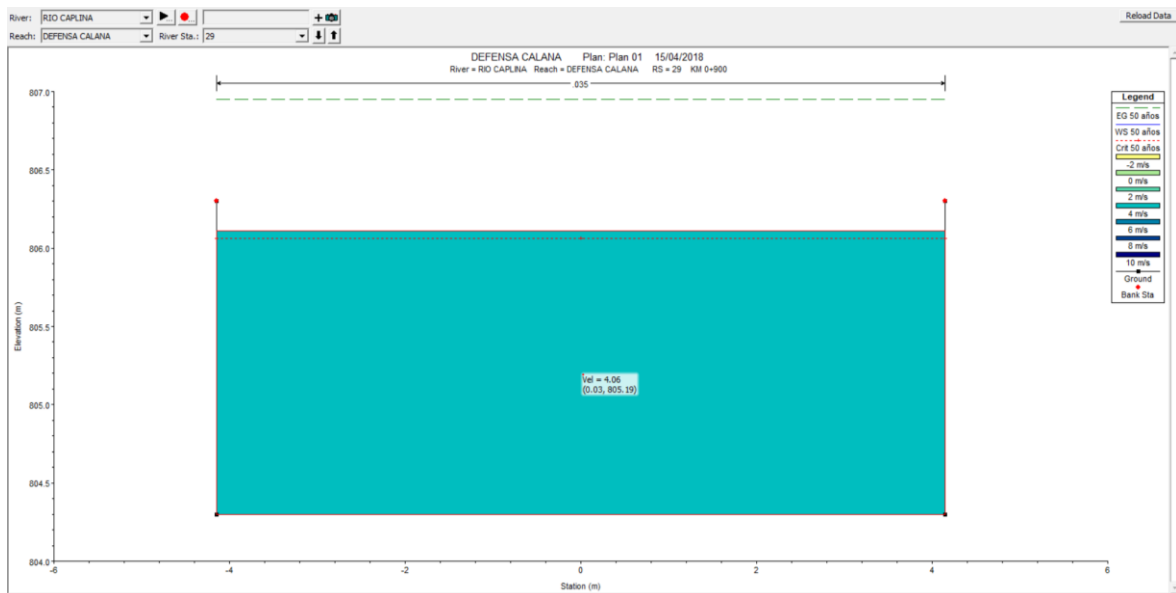
✓ PROGRESIVA KM 0 + 300:



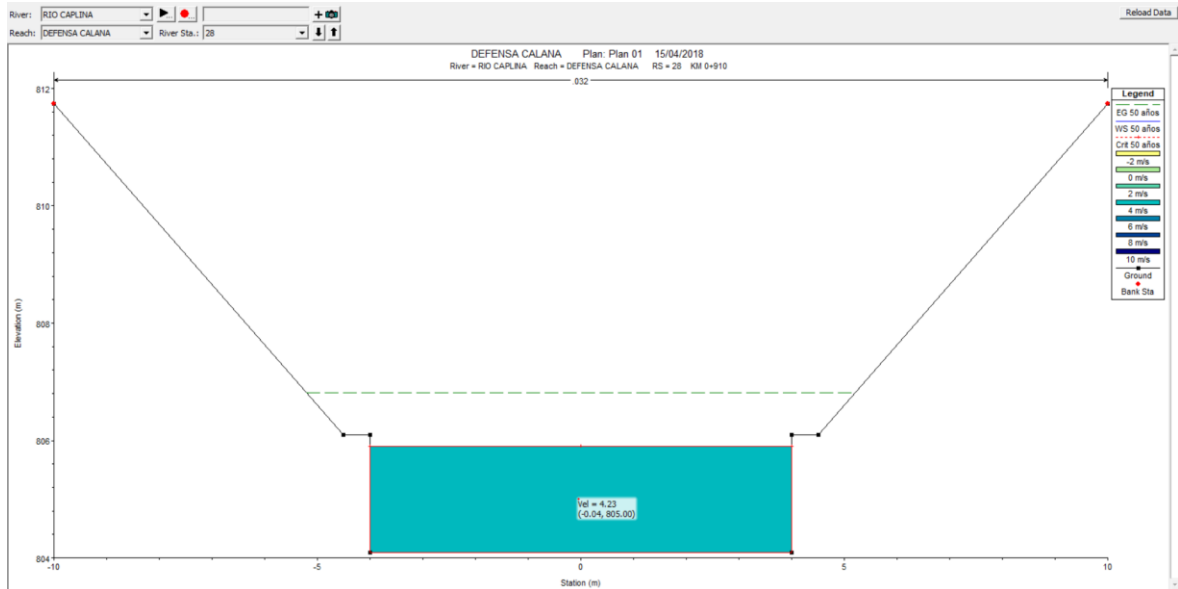
✓ PROGRESIVA KM 0 + 600:



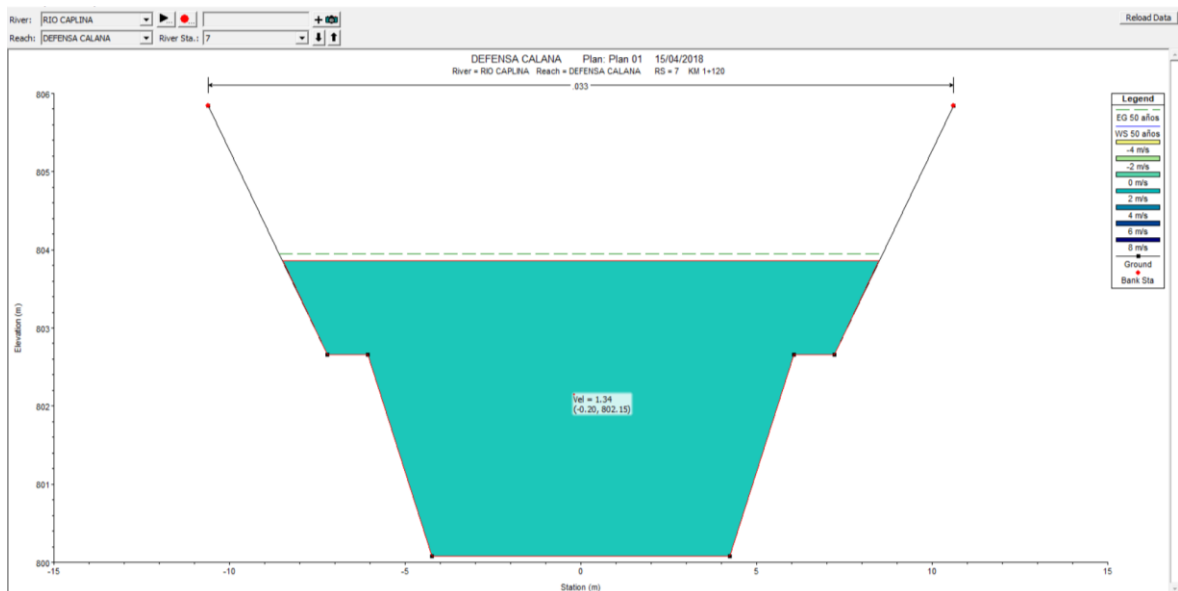
✓ PROGRESIVA KM 0 + 900:



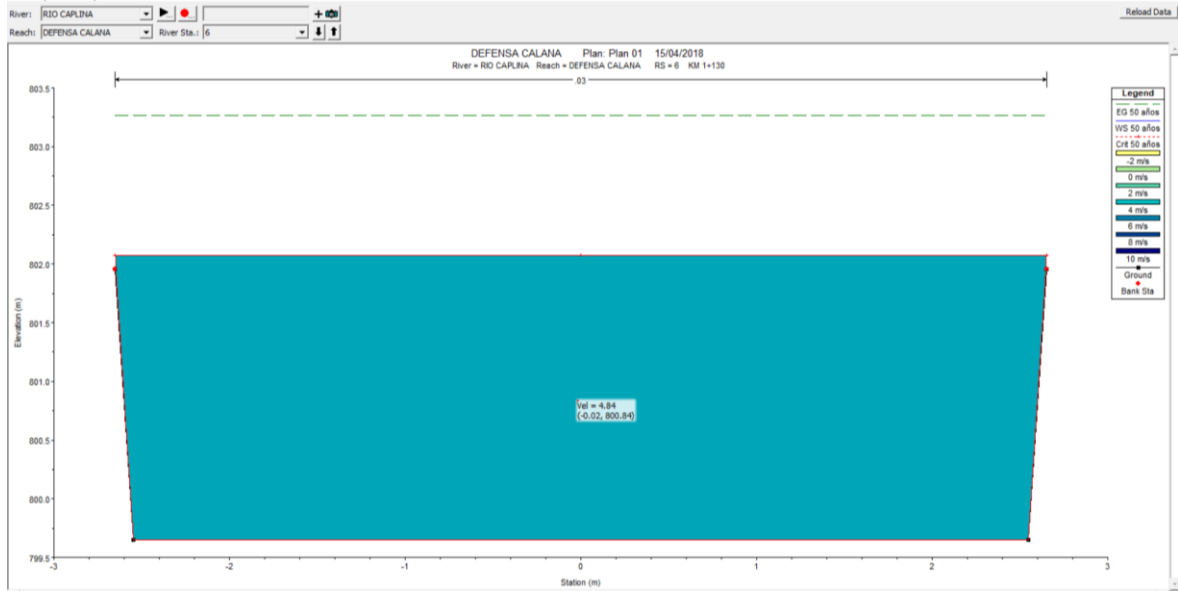
✓ PROGRESIVA KM 0 + 910:



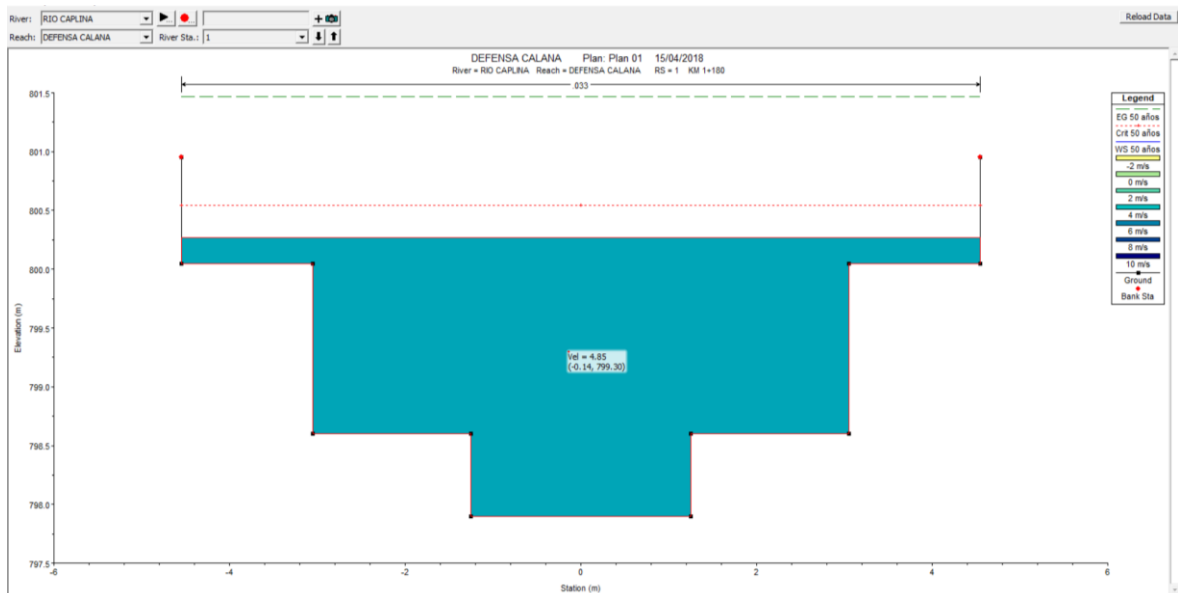
✓ PROGRESIVA KM 1 + 120:



✓ PROGRESIVA KM 1 + 130:

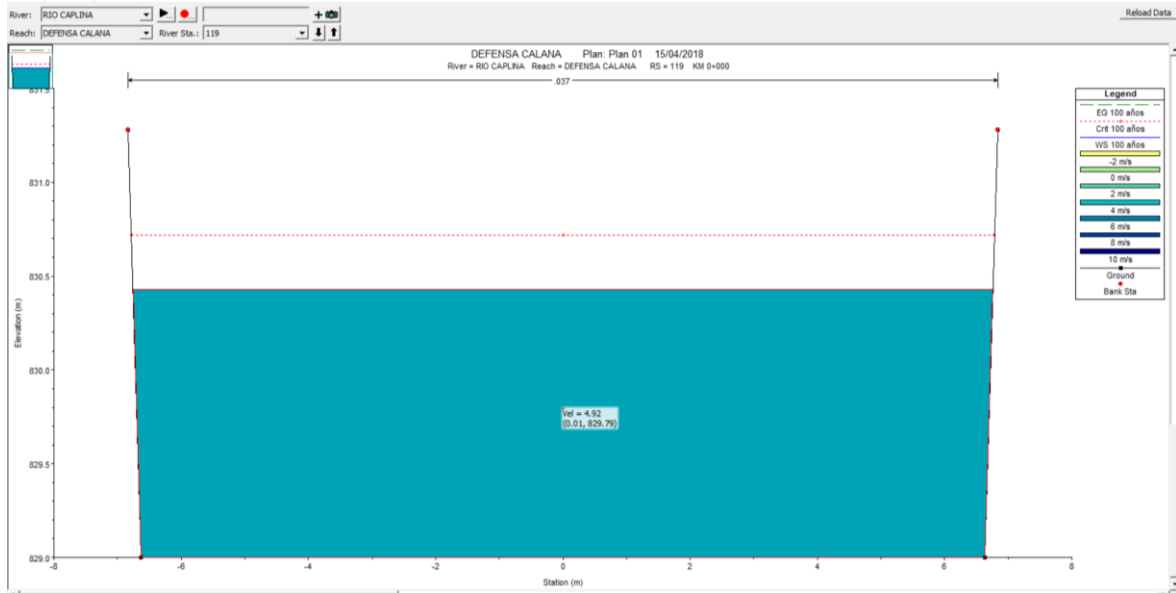


✓ PROGRESIVA KM 1 + 180:

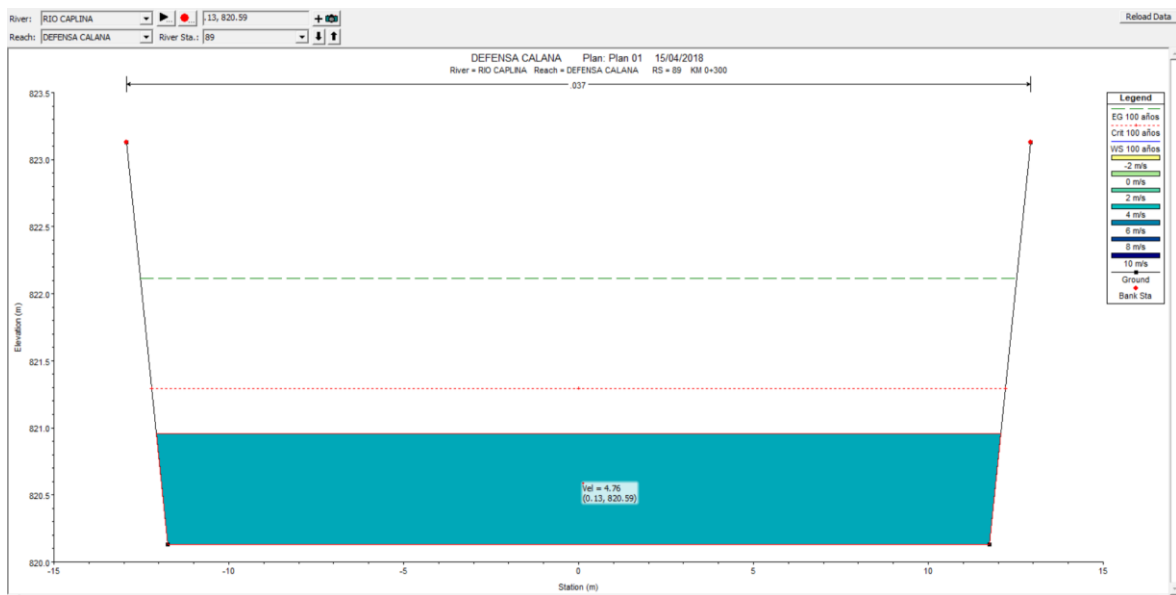


### C. PARA PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS – Q=94 m<sup>3</sup>/s:

✓ PROGRESIVA KM 0 + 000:

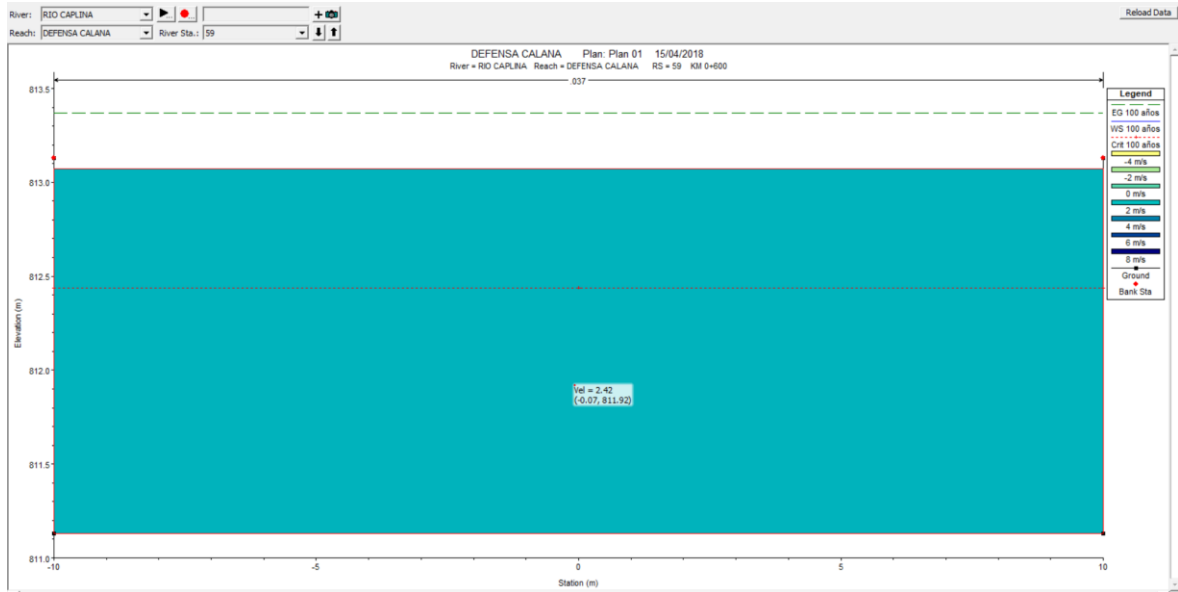


✓ PROGRESIVA KM 0 + 300:

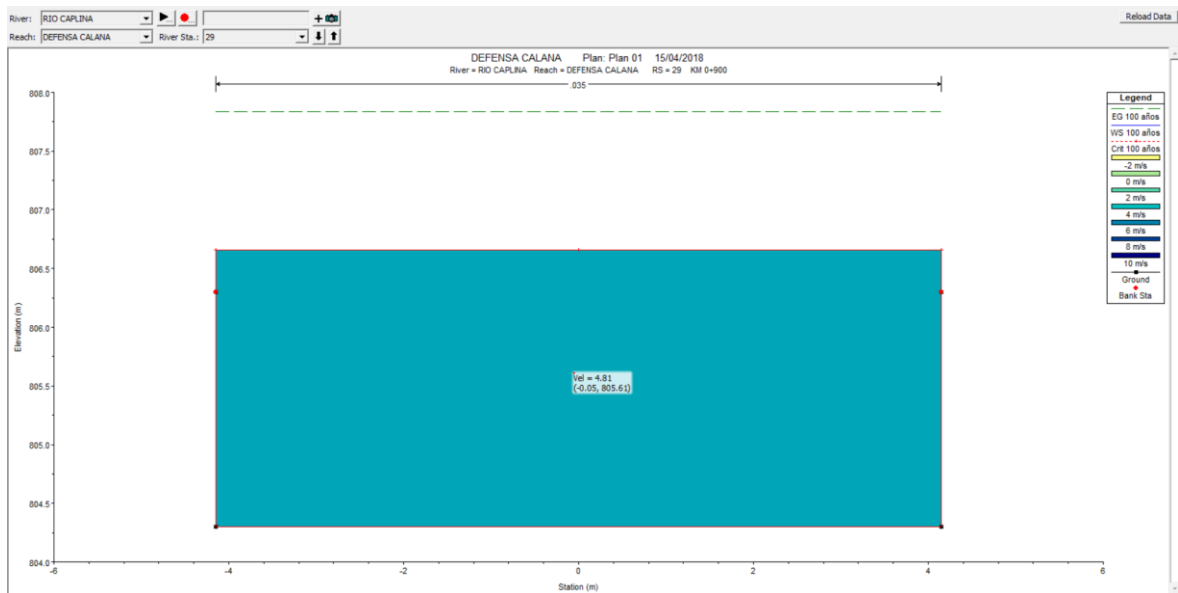




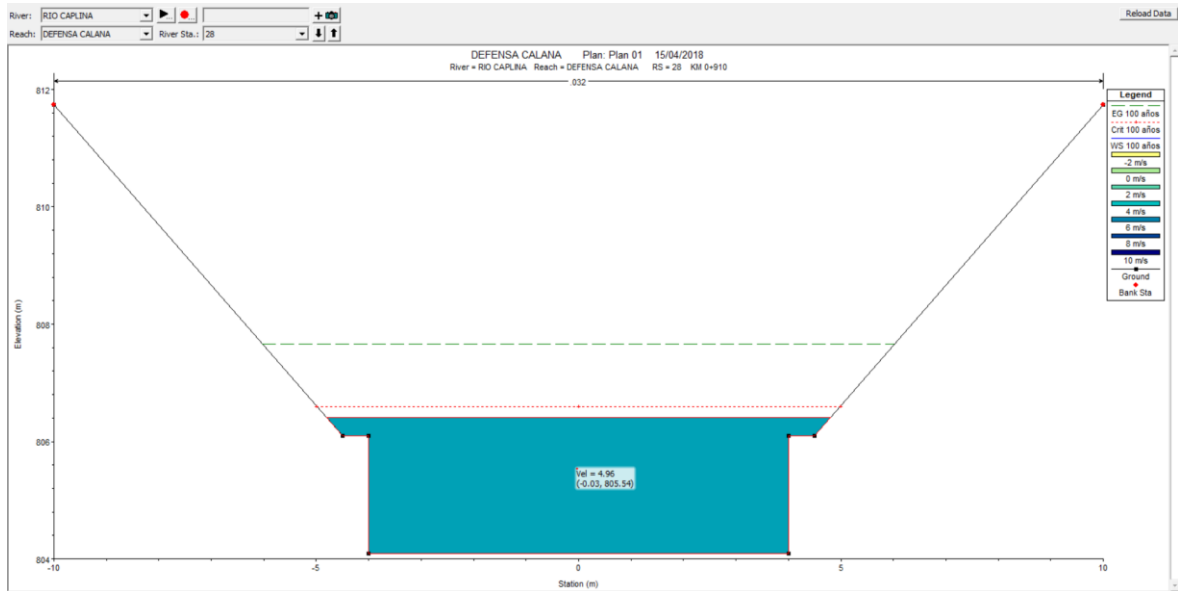
✓ PROGRESIVA KM 0 + 600:



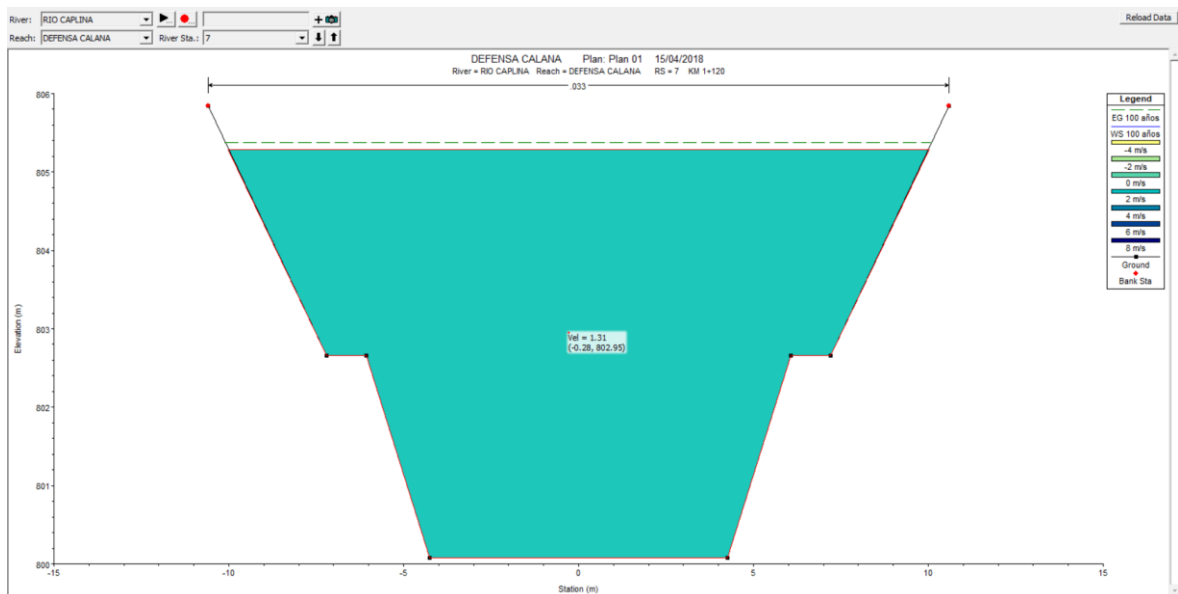
✓ PROGRESIVA KM 0 + 900:



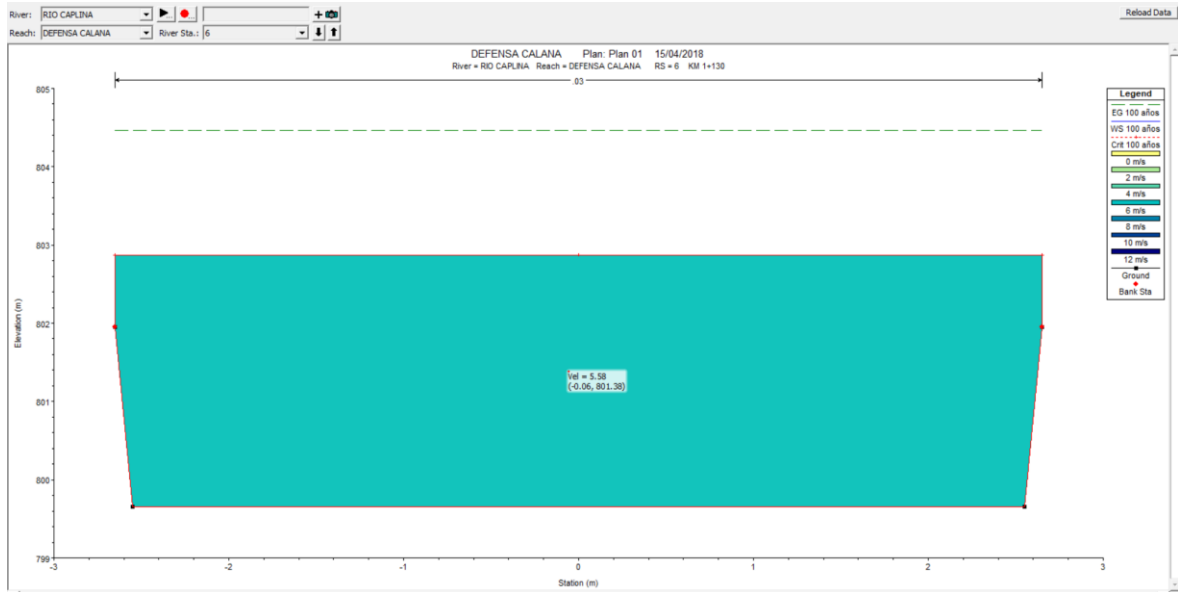
✓ PROGRESIVA KM 0 + 910:



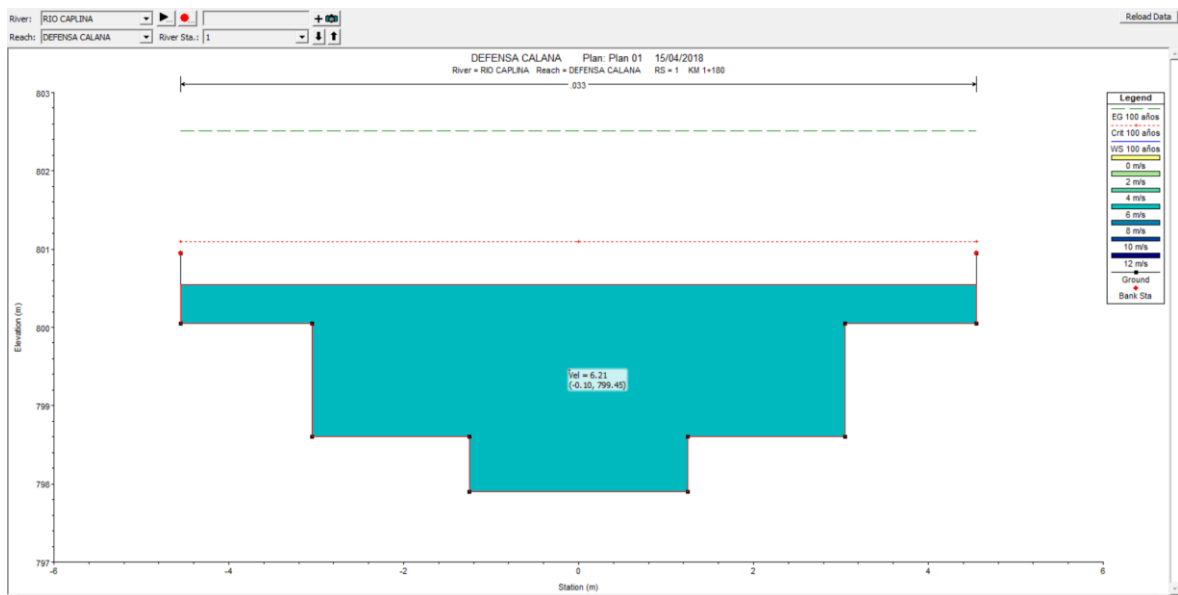
✓ PROGRESIVA KM 1 + 120:



✓ PROGRESIVA KM 1 + 130:

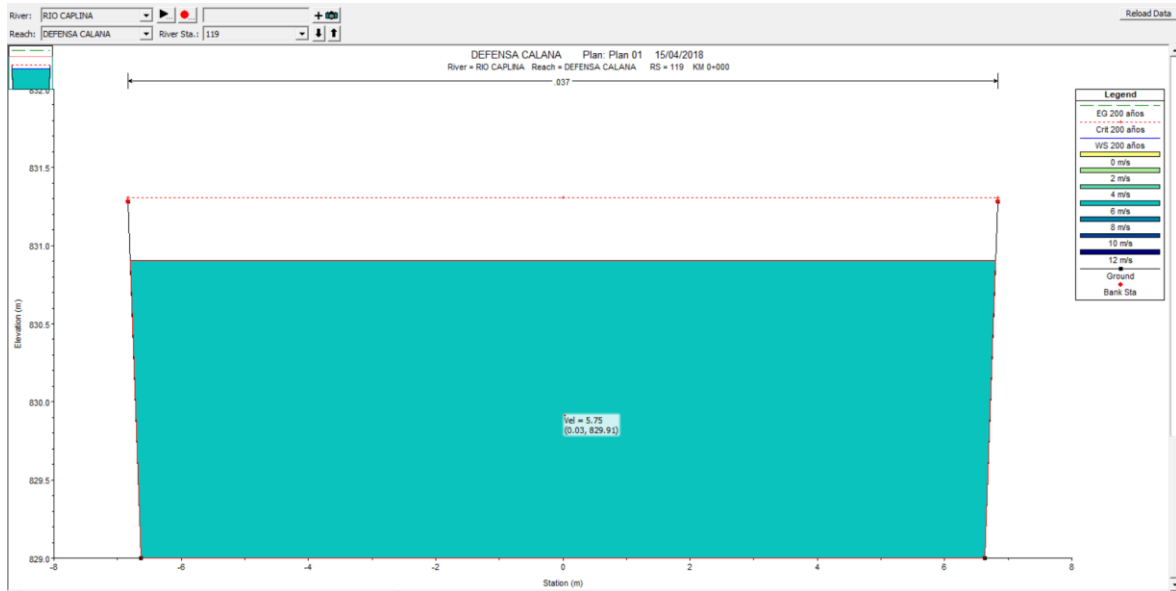


✓ PROGRESIVA KM 1 + 180:

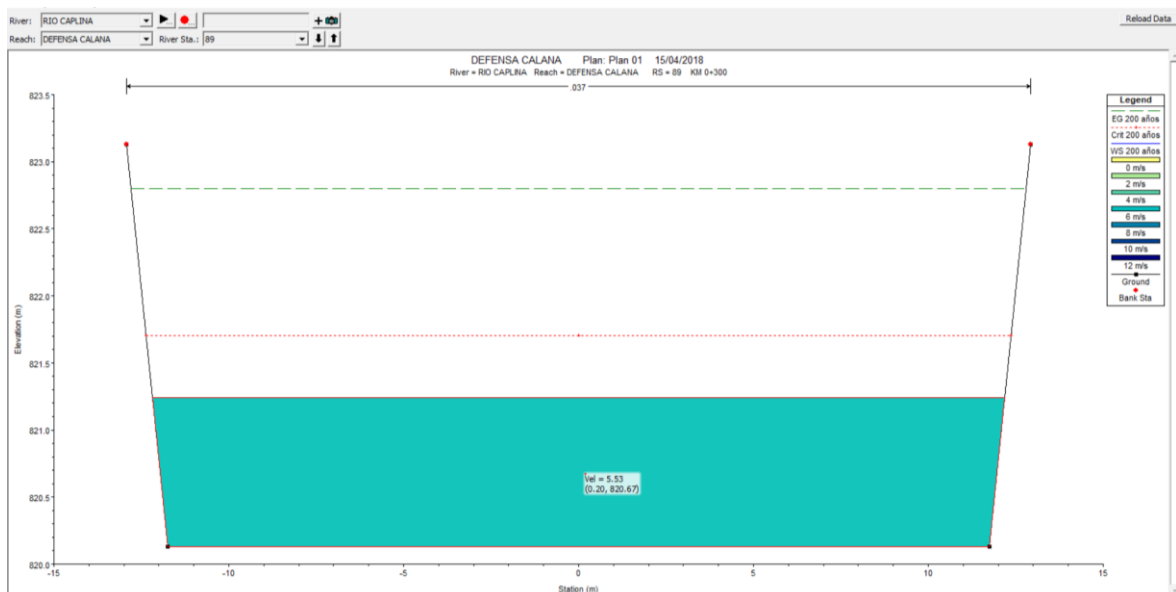


## D. PARA PERIODO DE RETORNO DE 200 AÑOS – $Q=147 \text{ m}^3/\text{s}$ :

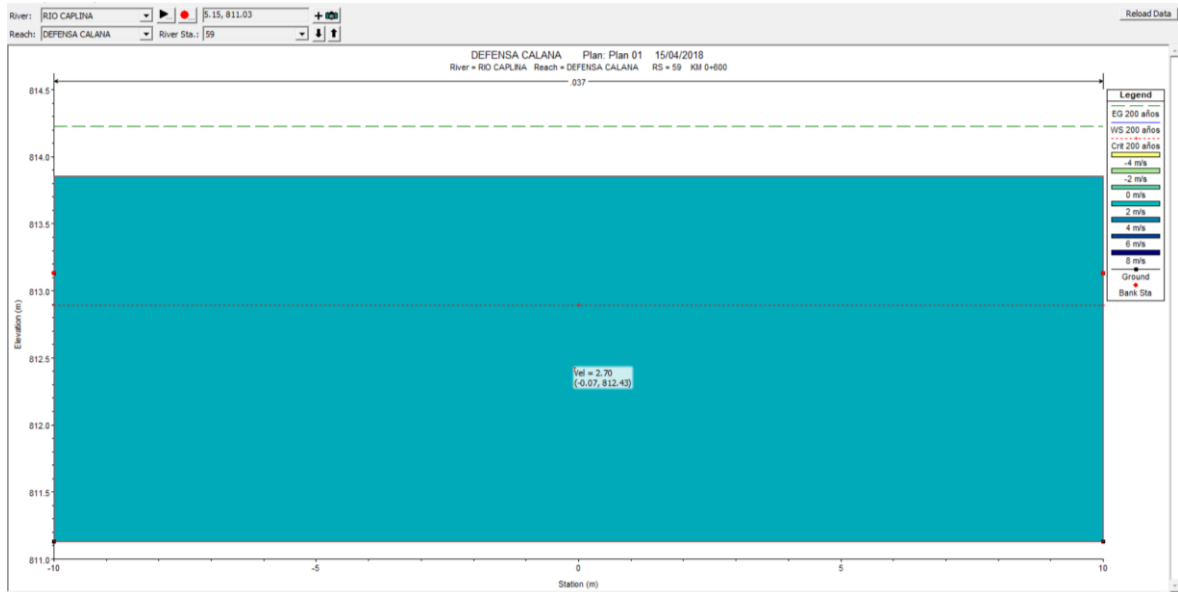
✓ PROGRESIVA KM 0 + 000:



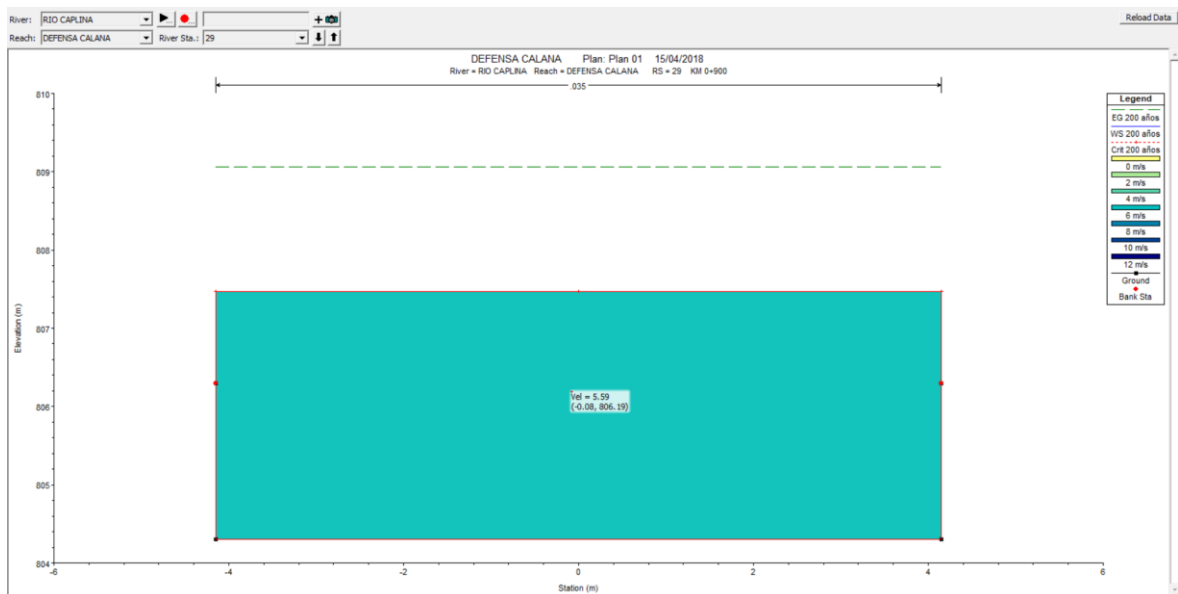
✓ PROGRESIVA KM 0 + 300:



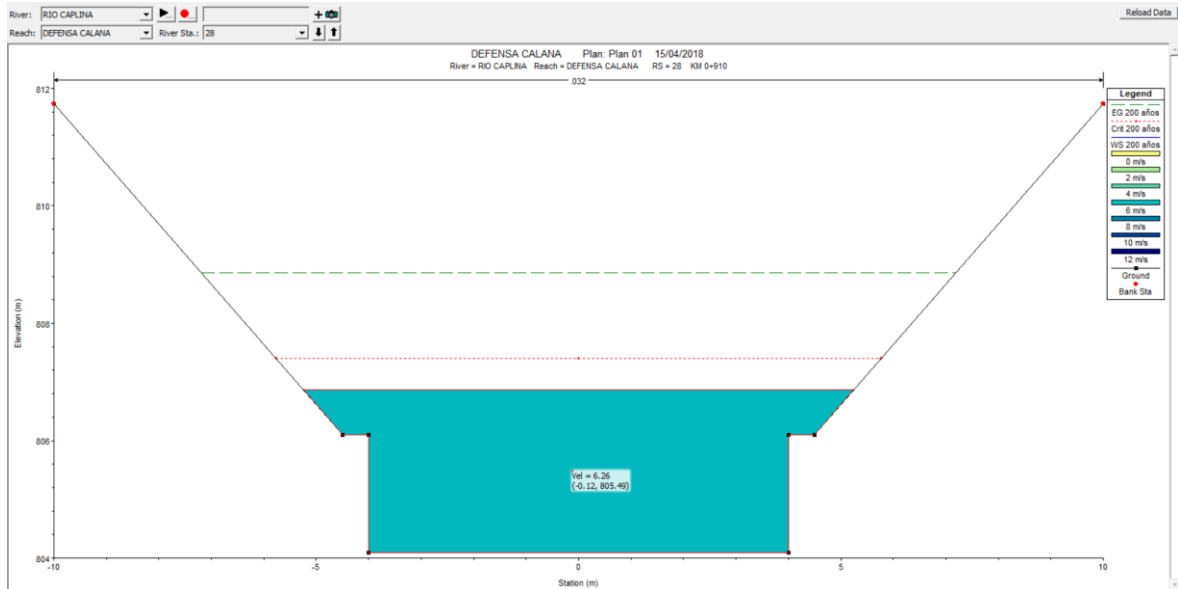
✓ PROGRESIVA KM 0 + 600:



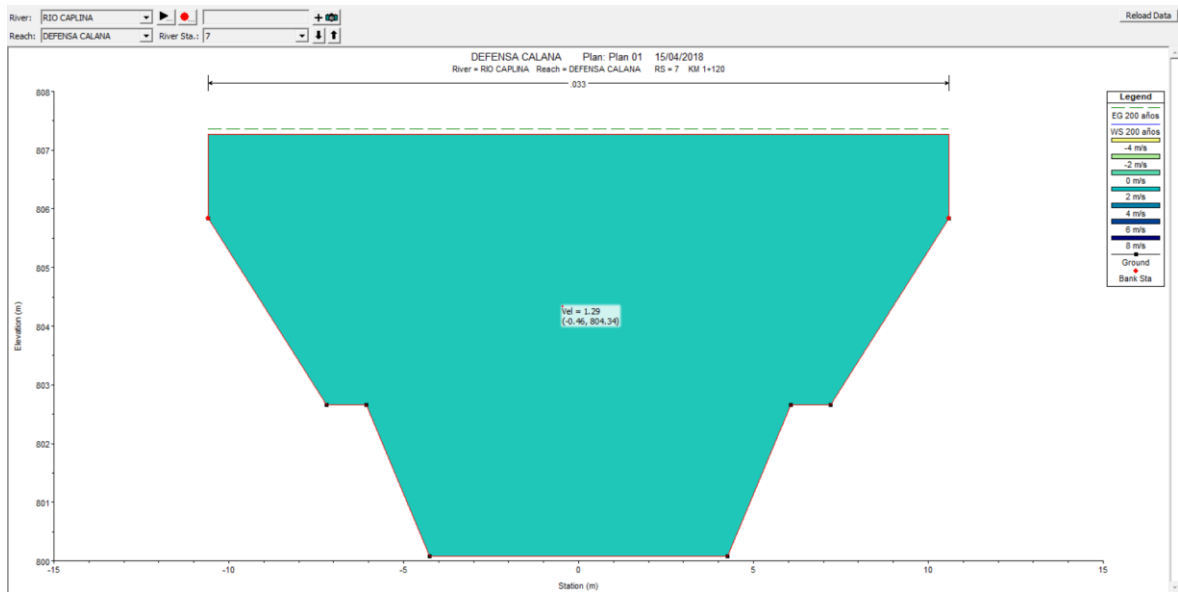
✓ PROGRESIVA KM 0 + 900:



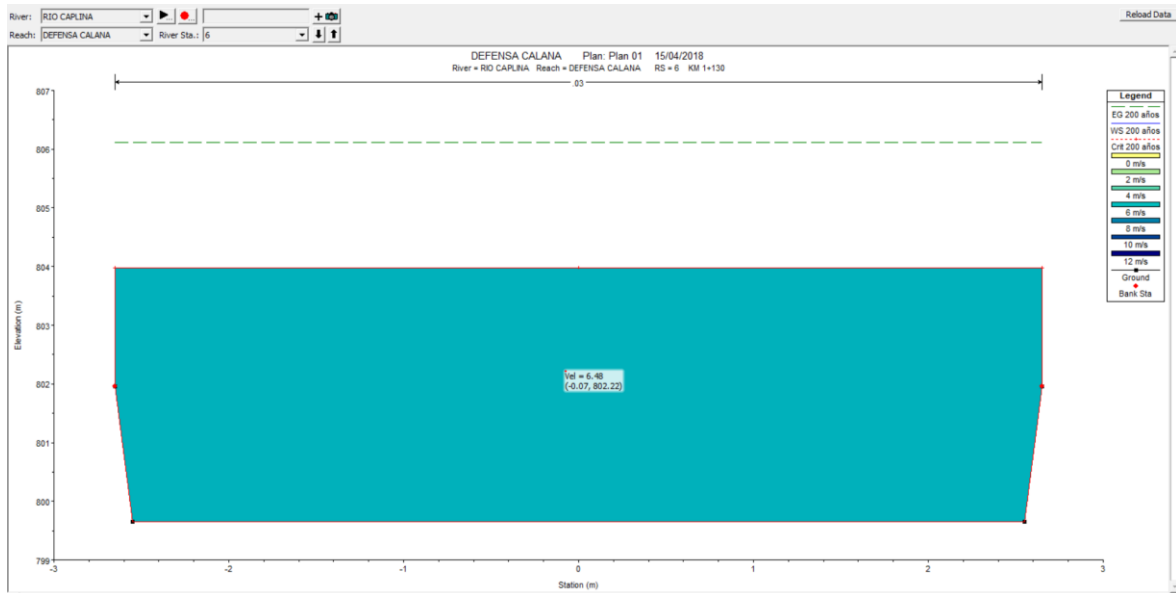
✓ PROGRESIVA KM 0 + 910:



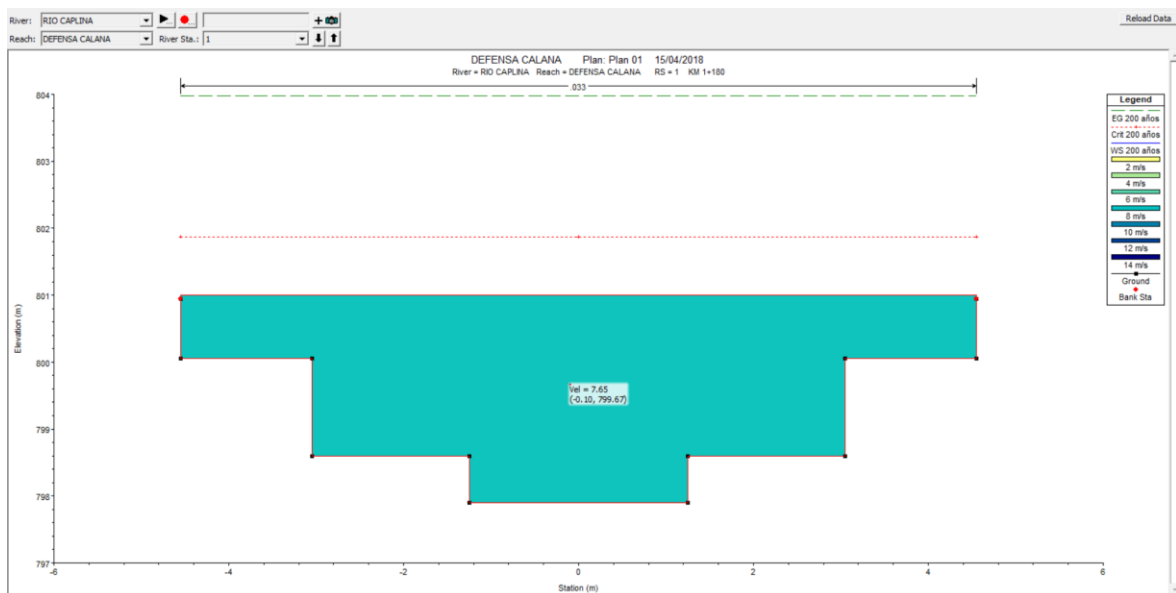
✓ PROGRESIVA KM 1 + 120:



✓ PROGRESIVA KM 1 + 130:



✓ PROGRESIVA KM 1 + 180:

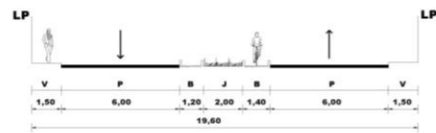


**ANEXO 3.**  
**PLANO DE UBICACIÓN**

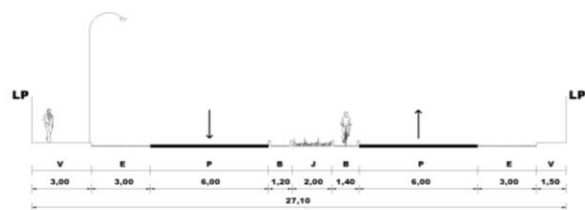




**PLANO DE LOCALIZACION**  
ESC. 1/25000



**SECCION A - A'**  
PUENTE CARRETERA TACNA - CALANA - PACHIA



**SECCION B - B'**  
CARRETERA TACNA - CALANA - PACHIA

UBICACION	
REGION	TACNA
PROVINCIA	TACNA
DISTRITO	CALANA



**PLANO DE UBICACION**  
ESC. 1/2500

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA



"MODELACION HIDRAULICA DE LA DEFENSA DE CALANA CON EL FIN DE DETERMINAR LA VULNERABILIDAD ANTE MÁXIMAS AVENIDAS"

**URBANISMO**  
UBICACION Y LOCALIZACION

DISTRITO: CALANA  
PROVINCIA: TACNA  
DEPARTAMENTO: TACNA

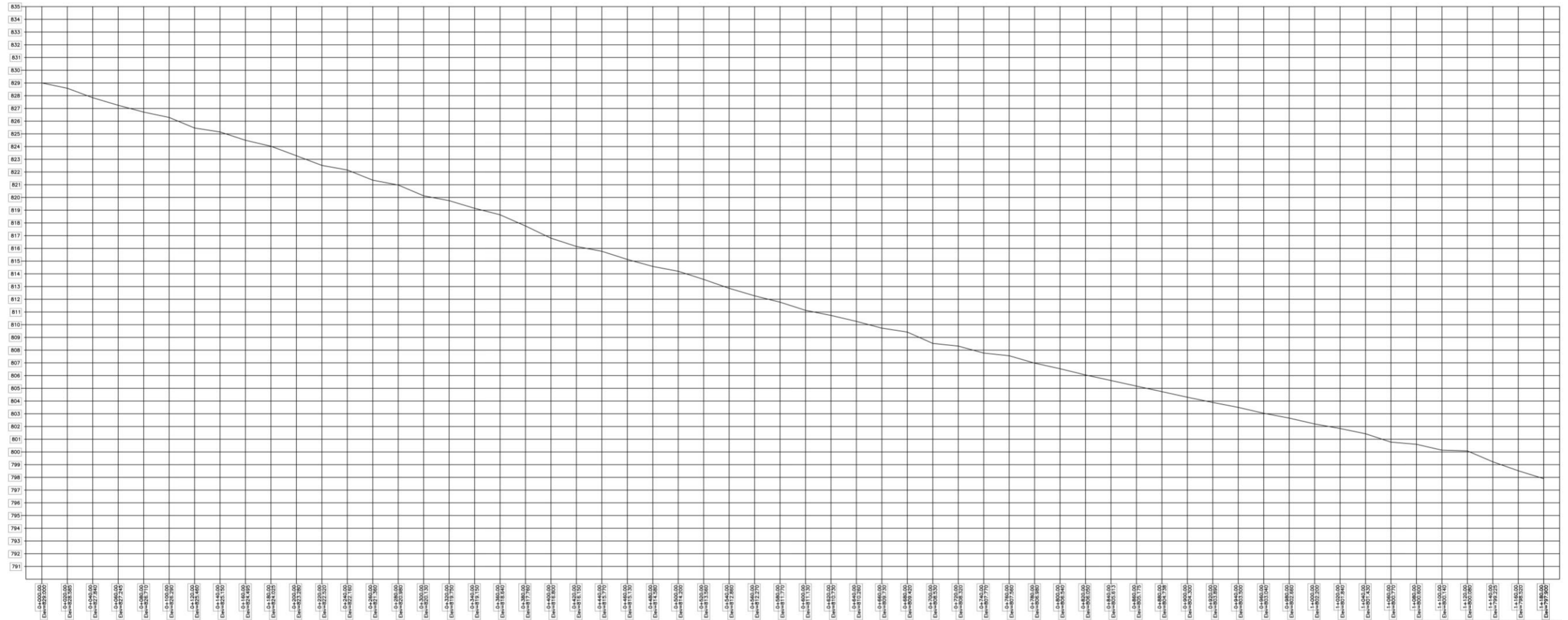
ELABORADO POR:  
Bach. Efraín R. Mamani Maquera  
Bach. Carlos A. Maya Rojas

REVISOR DE TESIS:  
Ph.D. Edwin M. Pino Vargas

FECHA: FEBRERO 2018  
INDICADA: **U-01**

**ANEXO 4.**  
**PERFIL TOPOGRÁFICO**

PERFIL LONGITUDINAL DEFENSA DE GALANA  
TRAMO KM 0 + 000 AL 1 + 180



PERFIL DEFENSA CALANA  
ESCALA HORIZONTAL 1 : 1000  
ESCALA VERTICAL 1 : 100



MODELACIÓN HORÁJICA  
DE LA OBRERA DE GALANA  
CON EL FIN DE DETERMINAR  
LA SALUBRIDAD ANTE  
MÁXIMAS AVENDAS

TOPOGRAFIA  
PERFIL LONGITUDINAL  
TRAMO KM 0 + 000  
AL KM 1 + 180

PROFESOR : CARLOS A. MAYTA  
ESTUDIANTE : EDAIN M. PINO VARGAS

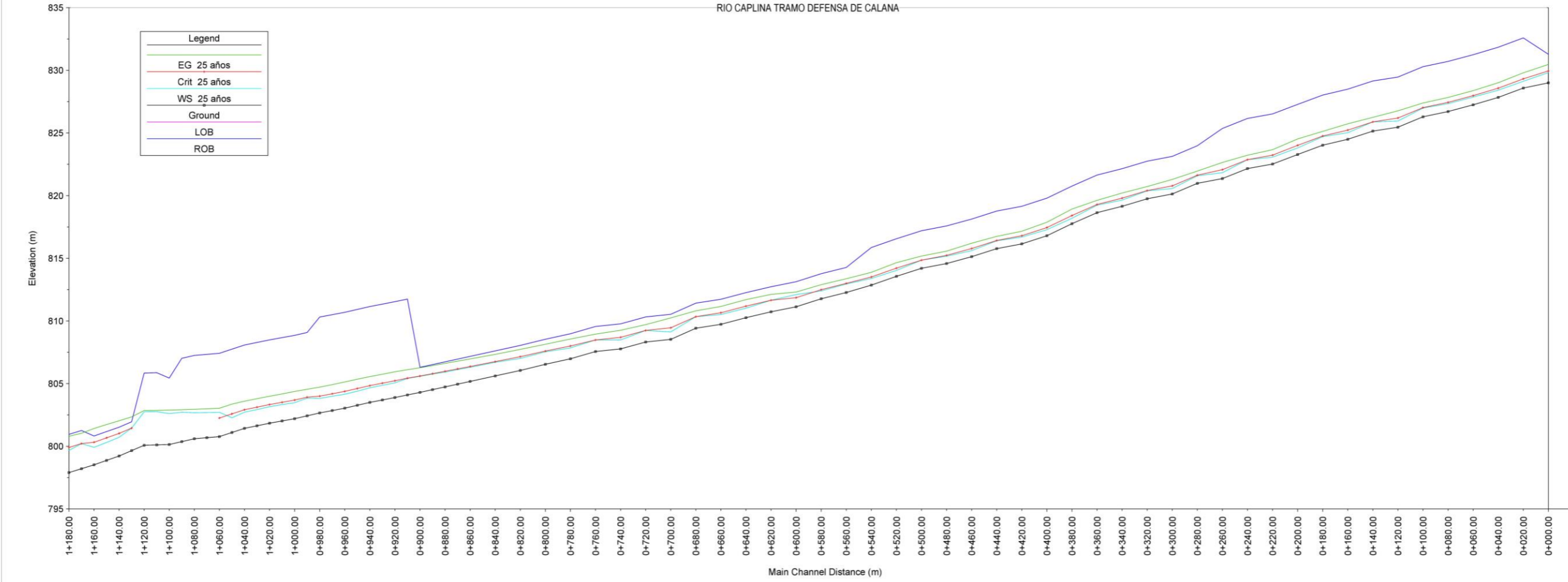
Bach. Edaín M. Pino Vargas  
Bach. Carlos A. Mayta  
Nieto

Ph. D. Edaín M. Pino Vargas

**ANEXO 5.**  
**PERFILES HIDRÁULICOS**

DEFENSA DE CALANA Perfiles - Periodo de Retorno 25 años

RIO CAPLINA TRAMO DEFENSA DE CALANA



UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA



MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA DEFENSA DE CALANA CON EL FIN DE DETERMINAR LA MÁXIMA COTA ANTE MÁXIMAS AVENIDAS\*

PERFILES HIDRÁULICOS  
 \*Escala H=V = 1:200  
 A: 1:1 = 1:100

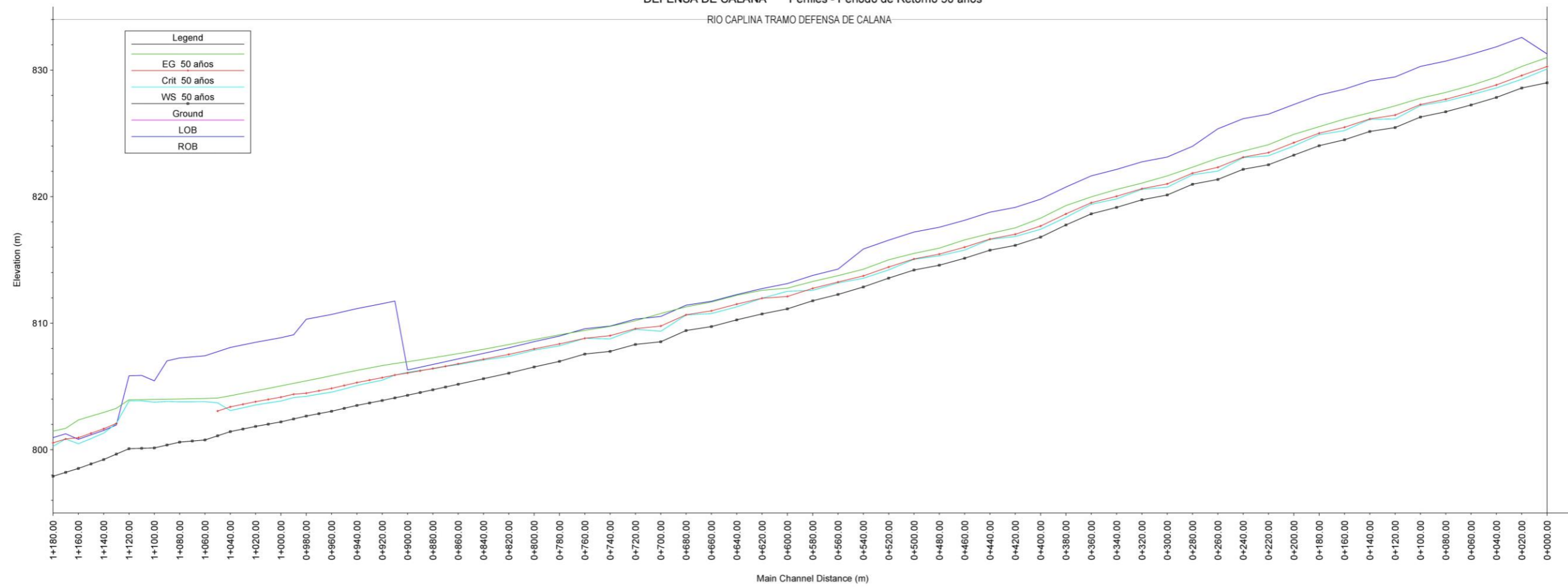
Elaborado por:  
 Ing. Edwin H. Marmón  
 Ing. Carlos A. Mayta Rojas

Revisado por:  
 Ph.D. Edwin M. Pino Vargas

PROYECTO: DEFENSA DE CALANA  
 FOLIO: P-01

DEFENSA DE CALANA Perfiles - Periodo de Retorno 50 años

RIO CAPLINA TRAMO DEFENSA DE CALANA



Legend	
EG 50 años	(Green line)
Crit 50 años	(Red line)
WS 50 años	(Cyan line)
Ground	(Black line with markers)
LOB	(Purple line)
ROB	(Blue line)



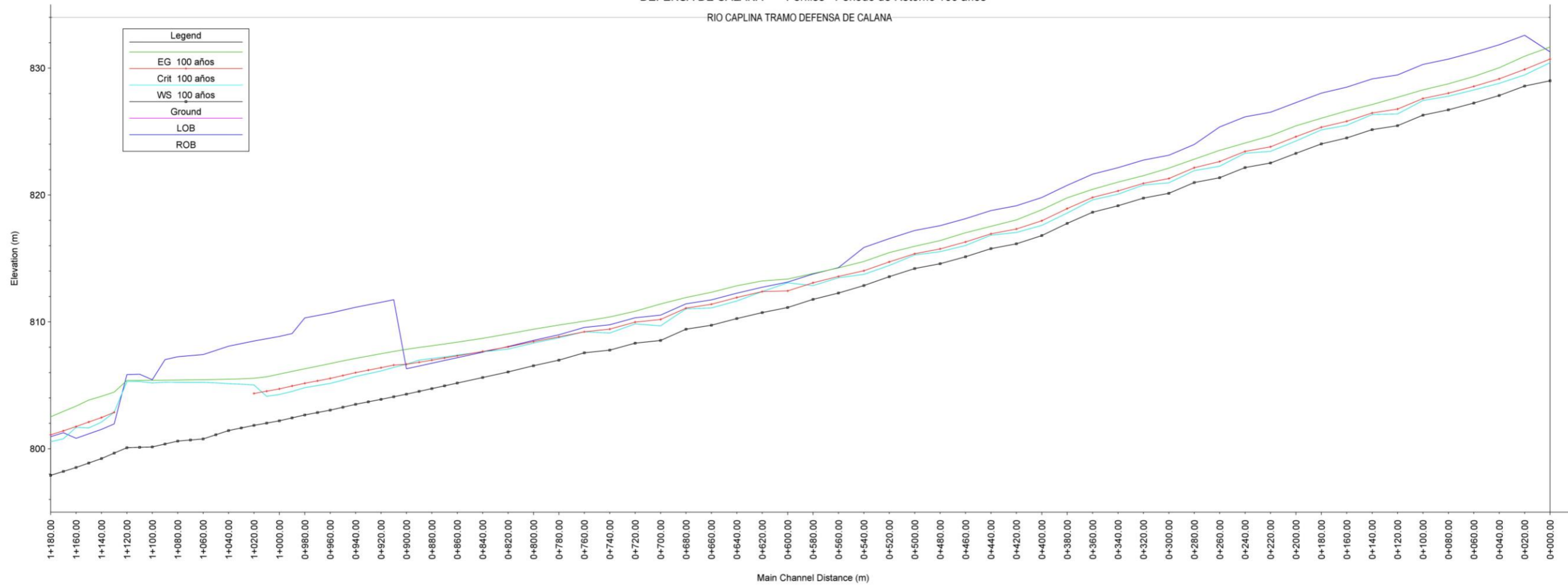
MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA DEFENSA DE CALANA CON EL FIN DE DETERMINAR LA VULNERABILIDAD ANTE MAXIMAS ANUNCIADAS

PERFILES HIDRÁULICOS TRAMO 0+000.00 - 1+180.00 A LA M 1:100

Elaborado por:  
Ing. Edwin R. Mamani Maquera  
Ing. Carlos A. Mayta Rojas

Revisado por:  
Ph.D. Edwin M. Pino Vargas

DEFENSA DE CALANA Perfiles - Periodo de Retorno 100 años  
 RIO CAPLINA TRAMO DEFENSA DE CALANA



Legend	
EG 100 años	(Green line)
Crit 100 años	(Red line)
WS 100 años	(Cyan line)
Ground	(Black line with markers)
LOB	(Purple line)
ROB	(Blue line)



MODELACION HIDRAULICA DE LA DEFENSA DE CALANA CON EL FIN DE DETERMINAR LA ALTIMETRIA MAS ADECUADA

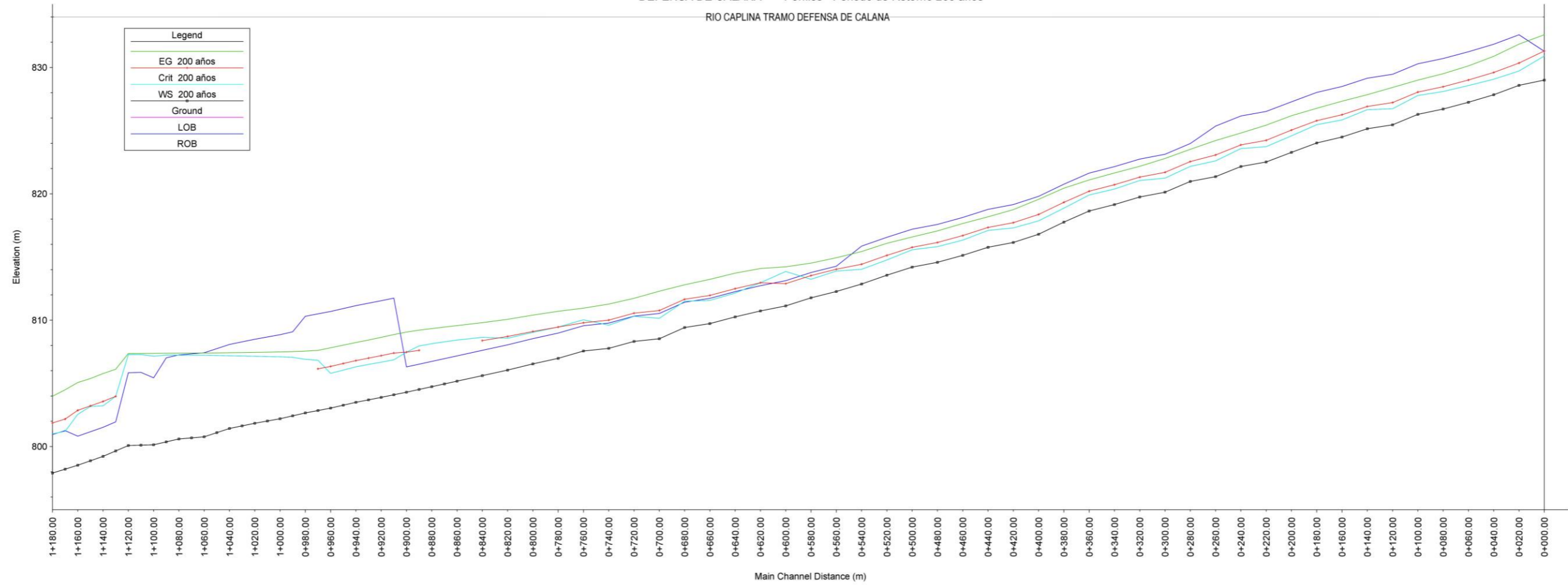
PERFILES HIDRAULICOS  
 TRAMO DEFENSA DE CALANA  
 AL 100 Y 100

Elaborado por:  
 Ing. Edwin H. Marmel  
 Alvaro  
 Ing. Carlos A. Mayta  
 Papeles

Revisado por:  
 Ph.D. Edwin M. Pico Vargas

DEFENSA DE CALANA Perfiles - Periodo de Retorno 200 años

RIO CAPLINA TRAMO DEFENSA DE CALANA



“MODIFICACIÓN HORALICA DE LA DEFENSA DE CALANA CON EL FIN DE DETERMINAR LA VULNERABILIDAD ENTE MÁXIMAS AVENIDAS”

PERFILES HIDRAULICOS TRAMO KM 0.000 AL KM 1.180

PROFESOR: CALANA, EDUARDO ALBERTO

DOCENTE: DACH, ERAIN R. MERRARI MAQUERA

DOCENTE: DACH, CARLOS A. MAYTA PÉREZ

PROFESOR: Ph.D. EDWIN M. PINO VARGAS



**ANEXO 6.**  
**ANÁLISIS DE FRECUENCIAS**

## ANÁLISIS DE FRECUENCIA

AÑO	Datos Q MA (m3/s)	Caudales Ordenados	m	n	F= m/n	F (%)	TR=1/F
1959	3.7346	36.7740	1	54	0.019	1.85	54.00
1960	5.7542	35.0000	2	54	0.037	3.70	27.00
1961	6.6501	24.2930	3	54	0.056	5.56	18.00
1962	3.8618	18.2660	4	54	0.074	7.41	13.50
1963	5.8923	14.4590	5	54	0.093	9.26	10.80
1964	2.5570	12.0030	6	54	0.111	11.11	9.00
1965	2.7050	11.6710	7	54	0.130	12.96	7.71
1966	1.8090	11.1820	8	54	0.148	14.81	6.75
1967	2.4590	11.0050	9	54	0.167	16.67	6.00
1968	4.4500	8.8490	10	54	0.185	18.52	5.40
1969	11.1820	8.1730	11	54	0.204	20.37	4.91
1970	2.1020	8.0530	12	54	0.222	22.22	4.50
1971	4.5360	7.9000	13	54	0.241	24.07	4.15
1972	2.7680	7.6240	14	54	0.259	25.93	3.86
1973	8.0530	7.0300	15	54	0.278	27.78	3.60
1974	5.0360	6.6501	16	54	0.296	29.63	3.38
1975	6.1220	6.1220	17	54	0.315	31.48	3.18
1976	8.8490	5.9380	18	54	0.333	33.33	3.00
1977	12.0030	5.8923	19	54	0.352	35.19	2.84
1978	4.6770	5.7610	20	54	0.370	37.04	2.70
1979	2.9790	5.7542	21	54	0.389	38.89	2.57
1980	2.2290	5.6179	22	54	0.407	40.74	2.45
1981	5.3490	5.3840	23	54	0.426	42.59	2.35
1982	1.9130	5.3490	24	54	0.444	44.44	2.25
1983	0.6990	5.0431	25	54	0.463	46.30	2.16
1984	8.1730	5.0360	26	54	0.481	48.15	2.08
1985	11.6710	4.6770	27	54	0.500	50.00	2.00
1986	11.0050	4.6288	28	54	0.519	51.85	1.93
1987	5.9380	4.5360	29	54	0.537	53.70	1.86
1988	3.9450	4.5060	30	54	0.556	55.56	1.80
1989	24.2930	4.4500	31	54	0.574	57.41	1.74
1990	1.9180	3.9450	32	54	0.593	59.26	1.69
1991	3.8360	3.9140	33	54	0.611	61.11	1.64
1992	1.6980	3.8618	34	54	0.630	62.96	1.59
1993	3.9140	3.8360	35	54	0.648	64.81	1.54
1994	5.3840	3.7346	36	54	0.667	66.67	1.50
1995	7.9000	3.5540	37	54	0.685	68.52	1.46
1996	2.6440	3.2550	38	54	0.704	70.37	1.42
1997	14.4590	3.2295	39	54	0.722	72.22	1.38
1998	18.2660	2.9790	40	54	0.741	74.07	1.35
1999	7.0300	2.7680	41	54	0.759	75.93	1.32
2000	7.6240	2.7050	42	54	0.778	77.78	1.29
2001	36.7740	2.6630	43	54	0.796	79.63	1.26
2002	5.7610	2.6440	44	54	0.815	81.48	1.23
2003	1.6500	2.5570	45	54	0.833	83.33	1.20
2004	3.5540	2.4590	46	54	0.852	85.19	1.17
2005	3.2550	2.2290	47	54	0.870	87.04	1.15
2006	4.5060	2.1020	48	54	0.889	88.89	1.13
2007	2.6630	1.9180	49	54	0.907	90.74	1.10
2008	5.6179	1.9130	50	54	0.926	92.59	1.08
2009	5.0431	1.8090	51	54	0.944	94.44	1.06
2010	3.2295	1.6980	52	54	0.963	96.30	1.04
2011	4.6288	1.6500	53	54	0.981	98.15	1.02
2012	35.0000	0.6990	54	54	1.000	100.00	1.00

**Interpolación lineal (2 puntos conocidos) para un Periodo de Retorno (T) de 25 años**

---

Valores

TR

Qmáx

27

35

18

24.293

25

**32.62**

**Interpolación lineal (2 puntos conocidos) para un Periodo de Retorno (T) de 50 años**

---

Valores

TR

Qmáx

54

36.774

27

35

50

**36.51**