



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN, PARA INUNDACIONES PROVOCADAS POR  
EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ, RETALHULEU**

**Erick Giovanni Alvarez Joya**

Asesorado por el Ing. Claudio César Castañón Contreras

Guatemala, enero de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN PARA INUNDACIONES  
PROVOCADAS POR EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ,  
RETALHULEU**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ERICK GIOVANNI ALVAREZ JOYA**

ASESORADO POR EL ING. CLAUDIO CÉSAR CASTAÑÓN CONTRERAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, ENERO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
EXAMINADOR	Ing. José Fernando Samayoa Roldán
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN, PARA INUNDACIONES PROVOCADAS POR EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ, RETALHULEU**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 7 de mayo de 2018.



**Erick Giovanni Alvarez Joya**

Guatemala Octubre de 2019

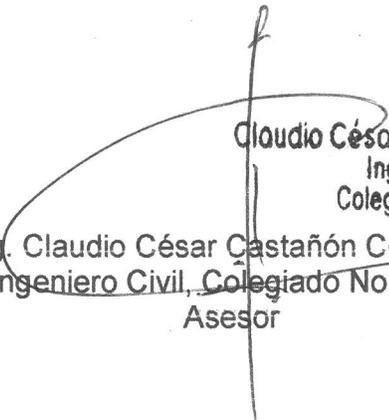
Ingeniero  
Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Jefe del Departamento de Hidráulica  
Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Ingeniero Aguilar.

Espero que todas sus actividades estén marchando de la mejor manera, por medio de la presente comunico a usted, que el trabajo de graduación titulado: **“PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN, PARA INUNDACIONES PROVOCADAS POR EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ, RETALHULEU”**, elaborado por el estudiante de ingeniería civil Erick Giovanni Alvarez Joya, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,

  
Claudio César Castañón Contreras  
Ingeniero Civil  
Colegiado No. 5,629  
Ing. Claudio César Castañón Contreras  
Ingeniero Civil, Colegiado No. 5629  
Asesor



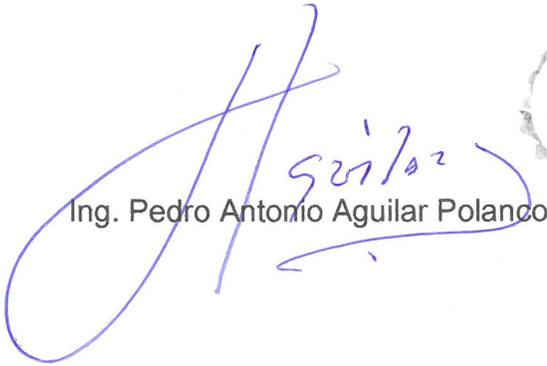
**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El director de la Escuela de Ingeniería Civil y Jefe del Departamento de Hidráulica, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Claudio César Castañón Contreras, al trabajo de graduación del estudiante Erick Giovanni Alvarez Joya **PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN, PARA INUNDACIONES PROVOCADAS POR EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ, RETALHULEU** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala, noviembre 2019

/mrm.



*Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua*

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref.DTG.013.2020

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCION, PARA INUNDACIONES PROVOCADAS POR EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ, RETALHULEU**, presentado por el estudiante universitario: **Erick Giovanni Alvarez Joya**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Aurelia Cordova', written over a large, faint circular watermark of the university seal.

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, Enero de 2020

AACE/asga  
cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Mi padre**

Erick Giovanni Alvarez Martínez (q.e.p.d.) te dedico esto con todo mi amor, eres y serás mi héroe, ídolo, líder de mi familia y por mucho el hombre más increíble que he conocido. Por ser el motivo de mis actos y esos 22 años de amor y enseñanza que dejaste en mí, los que estarán presentes en mi mente hasta el día de mi muerte. Siempre haremos que te sientas orgulloso, TE AMO QUERIDO PADRE.

### **Mi madre**

Julia Elvira Joya de Alvarez, por ser esa flor que prevalece ante cualquier adversidad y su apoyo incondicional en mis altas y bajas, TE AMO QUERIDA MADRE.

### **Mis hermanos**

José Andrés y María Paula Alvarez Joya, por todo aquello que compartimos y que nos falta por compartir.

### **Mi abuela**

Elvira Gonzales, por estar siempre ahí para mí, gracias por ser esa persona de luz en mi vida.

### **Mis abuelos**

Ramiro Alvarez, Ana Marina Martínez, por su amor y cariño desde que tengo memoria, los amo.

**Mi tía**

Victoria Eugenia García Gonzales, por su amor y entrega en todo momento de mi vida, te amo.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por abrirme la puerta del conocimiento y todo lo brindado en mis años de estudio.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser parte importante de mi formación.
<b>Mis tíos</b>	Glendy, Miguel, Melvin (q.e.p.d.), Mónica, Julian (q.e.p.d.), Juan Carlos, Federico, Lesbia, Rebeca, Aroldo, Jessica, César, Julio, Edgar, Enrique y Ulisar (q.e.p.d.).
<b>Ibis Kriz García</b>	Por ser esa gran persona de apoyo.
<b>Gerson Ismael Alvarez</b>	Por el gran apoyo dado a mi familia.
<b>Familia Alvarez Abril</b>	Por ser unas personas llenas de luz y bendición, gracias por el apoyo brindado a mi familia en 2016, eternamente agradecido.
<b>Nectaly Marroquín</b>	Por su amistad y el gran apoyo brindado en la realización de mi trabajo de graduación.
<b>Ing. Claudio Castañón</b>	Por el apoyo brindado durante la realización de mi trabajo de graduación.
<b>Edwin y Beda García</b>	Por su muestra de amor y apoyo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN .....	XVII
OBJETIVOS .....	XIX
INTRODUCCIÓN .....	XXI
1. CONCEPTOS GENERALES .....	1
1.1. Ciclo hidrológico .....	1
1.2. Fases del ciclo hidrológico .....	2
1.2.1. Precipitación .....	2
1.2.2. Evaporación y transpiración .....	2
1.2.3. Escorrentía superficial .....	3
1.2.4. Infiltración .....	3
1.3. Hidrografía de Guatemala .....	4
1.4. Componentes básicos del riesgo .....	6
1.4.1. Riesgo .....	6
1.4.2. Amenaza .....	6
1.4.3. Vulnerabilidad .....	7
1.4.4. Desastre .....	7
1.4.5. Inundación .....	7
1.4.5.1. Tipos de inundación .....	7
1.4.5.2. Desbordamiento de un cauce .....	8
1.4.5.3. Insuficiencia de drenaje del agua precipitada .....	8

	1.4.5.4.	Consecuencias de las inundaciones .....	8
1.5.		Potenciales amenazas hidrometeorológicas que afectan a Guatemala .....	9
2.		CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO MULUÁ .....	15
2.1.		Ubicación geográfica de la cuenca .....	15
2.2.		Delimitación de la cuenca .....	18
2.3.		Determinación de los parámetros morfométricos de la cuenca .....	18
	2.3.1.	Área y perímetro de la cuenca de estudio .....	18
	2.3.2.	Forma de la cuenca .....	19
	2.3.2.1.	Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad .....	19
	2.3.2.2.	Factor de forma .....	20
	2.3.3.	Características de relieve .....	21
	2.3.3.1.	Pendiente media de la cuenca .....	21
	2.3.3.2.	Histograma de frecuencias altimétricas .....	22
	2.3.3.3.	Curva hipsométrica .....	23
	2.3.3.4.	Pendiente del cauce principal .....	25
	2.3.4.	Características de la red de drenaje .....	26
	2.3.4.1.	Orden de la cuenca .....	26
	2.3.4.2.	Densidad de drenaje .....	27
	2.3.4.3.	Frecuencias de cauces .....	28
3.		ANÁLISIS DE CRECIDAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO .....	31
3.1.		Régimen de lluvias en la boca costa .....	31
3.2.		Método racional .....	33
	3.2.1.	Determinación de la intensidad (i) .....	34

3.2.2.	Cálculo de intensidad de lluvia en la cuenca del río Muluá.....	34
3.2.3.	Cálculo de coeficientes de escorrentía (C).....	38
3.2.4.	Caudales instantáneos máximos .....	42
3.3.	Análisis regional de crecidas .....	43
3.3.1.	Determinación de caudales.....	47
3.3.2.	Caudales instantáneos máximos en la cuenca del río Muluá.....	50
3.4.	Comparación de resultados .....	50
4.	APLICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN HEC-RAS EN EL TRAMO DEL RÍO MULUÁ.....	53
4.1.	Introducción al programa HEC-RAS .....	53
4.2.	Procesamiento y análisis de la información .....	54
4.2.1.	Levantamiento topográfico .....	54
4.2.2.	Cálculo del caudal instantáneo máximo de diseño utilizado para la simulación hidráulica en HEC-RAS .....	57
4.2.3.	Selección de los coeficientes de rugosidad de Manning.....	58
4.3.	Datos hidráulicos del río Muluá.....	60
4.4.	Simulación de inundación en el tramo de estudio del río Muluá.....	60
4.4.1.	Resultado de la simulación de inundación en el tramo de estudio del río Muluá.....	65
5.	PROPUESTA DE LA OBRA DE PROTECCIÓN .....	69
5.1.	Descripción de las obras de protección .....	69
5.1.1.	Bordas .....	69

5.1.2.	Bordas revestidas de roca .....	69
5.1.3.	Espigones.....	70
5.1.4.	Muros longitudinales.....	70
5.2.	Propuesta.....	70
5.3.	Propiedades de las obras hidráulicas .....	71
5.3.1.	Extensión de la protección.....	71
5.3.2.	Altura de la borda .....	72
5.3.3.	Especificaciones técnicas de la roca .....	72
5.3.3.1.	Peso específico de la roca.....	73
5.3.3.2.	Ensayo de abrasión .....	73
5.3.3.3.	Ensayo de resistencia de sulfatos.....	73
5.4.	Diseño de bordas .....	74
5.4.1.	Predimensionamiento estructural .....	74
5.4.2.	Cargas aplicadas a las bordas.....	77
5.4.2.1.	Cargas horizontales.....	77
5.4.2.2.	Cargas verticales .....	78
5.4.3.	Comprobación por volteo.....	78
5.4.4.	Comprobación por deslizamiento .....	84
5.4.5.	Comprobación por presiones.....	85
6.	RECTIFICACIÓN HIDRÁULICA DE LAS OBRAS DE PROTECCIÓN PROPUESTAS .....	93
6.1.	Realización de simulaciones del modelo HEC-RAS con las estructuras propuestas .....	93
6.2.	Resultado gráfico de las secciones transversales del río Muluá .....	93
6.3.	Conclusiones de la modelación hidráulica con el software HEC-RAS.....	97

CONCLUSIONES .....	99
RECOMENDACIONES.....	101
BIBLIOGRAFÍA.....	103
APÉNDICES.....	105



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Ciclo hidrológico.....	3
2.	Vertientes de Guatemala.....	5
3.	Mapa de riesgo a inundaciones.....	10
4.	Mapa de amenaza por inundaciones de la república de Guatemala ....	12
5.	Mapa de localización del municipio de Santa Cruz Muluá en Retalhuleu.....	15
6.	Mapa de localización de la cuenca del río Muluá .....	16
7.	Mapa de localización de Santa Cruz Muluá.....	17
8.	Histograma de frecuencias altimétricas.....	23
9.	Curva hipsométrica .....	25
10.	Orden de la cuenca del río Muluá .....	27
11.	Distribución de precipitación media mensual, período 1991 a 2018 estación de Retalhuleu.....	31
12.	Datos de precipitación acumulada anual, período 1991 a 2018 estación de Retalhuleu.....	32
13.	Estaciones meteorológicas del INSIVUMEH .....	37
14.	Áreas del material de la cuenca para el cálculo de los coeficientes de escorrentía superficial .....	39
15.	Regiones hidrológicas para la estimación de crecidas .....	44
16.	Proyección del levantamiento topográfico realizado en el río Muluá ....	55
17.	Levantamiento topográfico realizado en el río Muluá .....	56
18.	Banco de marca dejado en el área de estudio .....	57
19.	Tipo de suelo presente en el río Muluá .....	58

20.	Simulación hidráulica en la estación 0+000 .....	61
21.	Simulación hidráulica en la estación 0+100 .....	61
22.	Simulación hidráulica en la estación 0+200 .....	61
23.	Simulación hidráulica en la estación 0+300 .....	62
24.	Simulación hidráulica en la estación 0+400 .....	62
25.	Simulación hidráulica en la estación 0+500 .....	62
26.	Simulación hidráulica en la estación 0+600 .....	63
27.	Simulación hidráulica en la estación 0+700 .....	63
28.	Simulación hidráulica en la estación 0+800 .....	63
29.	Simulación hidráulica en la estación 0+900 .....	64
30.	Simulación hidráulica en la estación 1+000 .....	64
31.	Simulación hidráulica en la estación 1+100 .....	64
32.	Simulación hidráulica en la estación 1+188 .....	65
33.	Proyección de las áreas de desbordamiento del río Muluá .....	66
34.	Extensión longitudinal de la protección de un cauce .....	71
35.	Predimensionamiento de bordas .....	75
36.	Medidas preliminares de la borda del tramo TD1 .....	76
37.	Fuerzas horizontales que actúan en una borda .....	77
38.	Fuerzas verticales que actúan en una borda .....	78
39.	Diagrama de fuerzas que actúan en la borda del tramo TD1 .....	79
40.	División geométrica de la borda del tramo TD1 .....	82
41.	Diagrama de presiones en la base del muro .....	85
42.	Sección típica de la borda del tramo TD1 .....	88
43.	Sección típica de la borda del tramo TD2 .....	89
44.	Sección típica de la borda del tramo TD3 .....	89
45.	Sección típica de la borda del tramo TD4 .....	90
46.	Sección típica de la borda del tramo TD5 .....	90
47.	Sección típica de la borda del tramo TD6 .....	91
48.	Sección típica de la borda del tramo TD7 .....	91

49.	Simulación con las obras propuestas en la estación 0+200 .....	93
50.	Simulación con las obras propuestas en la estación 0+300 .....	94
51.	Simulación con las obras propuestas en la estación 0+500 .....	94
52.	Simulación con las obras propuestas en la estación 0+580 .....	94
53.	Simulación con las obras propuestas en la estación 0+960 .....	95
54.	Simulación con las obras propuestas en la estación 0+980 .....	95
55.	Simulación con las obras propuestas en la estación 1+020 .....	95
56.	Simulación con las obras propuestas en la estación 1+140 .....	96
57.	Simulación con las obras propuestas en la estación 1+160 .....	96
58.	Simulación con las obras propuestas en la estación 0+800 .....	96
59.	Proyección de las obras de protección propuestas en el río Muluá .....	98

## TABLAS

I.	Cálculo de pendiente media de la cuenca del río Muluá.....	22
II.	Cálculo de la curva hipsométrica.....	24
III.	Resumen de las características morfométricas de la cuenca .....	29
IV.	Tiempo de concentración de la cuenca .....	36
V.	Curvas de intensidad, duración y frecuencia de la estación meteorológica Retalhuleu.....	37
VI.	Cálculo de la intensidad de lluvia .....	38
VII.	Áreas del material de la cuenca .....	40
VIII.	Valores indicativos del coeficiente de escorrentía .....	40
IX.	Cálculo del coeficiente de escorrentía.....	41
X.	Cálculo de los caudales instantáneos máximos .....	42
XI.	Regiones hidrológicas para el análisis regional de crecidas.....	45
XII.	Cuantiles de caudales modulares regionales k según curva envolvente superior .....	46

XIII.	Cuantiles de caudales modulares regionales k distribución de Gumbel.....	46
XIV.	Caudal máximo medio para la cuenca del río Muluá.....	48
XV.	Caudales modulares, K, según curva envolvente superior .....	48
XVI.	Caudales modulares, K, distribución de Gumbel .....	49
XVII.	Caudales máximos, asociados a períodos de retorno (tr) en función de caudales modulares regionales k con distribuciones indicadas.....	50
XVIII.	Comparativa de caudales instantáneos máximos .....	51
XIX.	Valores de coeficiente de Manning .....	59
XX.	Valores estimados de los coeficientes de Manning.....	60
XXI.	Áreas de desbordamiento del río Muluá .....	65
XXII.	Altura de la lámina de agua de la estación 0+180 a la estación 0+320, para el caudal con período de retorno de 100 años .....	75
XXIII.	Datos de diseño para las bordas .....	79
XXIV.	Momentos resistentes respecto del punto A de la borda del tramo TD1 .....	82
XXV.	Cálculo de presiones y momentos aplicados en la borda del tramo TD1 .....	83

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$\phi$	Ángulo de reposo de un material
A	Área
Kc	Coefficiente de compacidad
n	Coefficiente de rugosidad de Manning
E	Este
Kf	Factor de forma
F	Frecuencia de los cauces de una cuenca
°	Grados
°C	Grados Celsius
Ha	Hectárea
Km	Kilómetro
Km <sup>2</sup>	Kilómetro cuadrado
Km <sup>3</sup>	Kilómetro cúbico
m <sup>3</sup> /s	Metros cúbicos por segundo
mm	Milímetro
mm/año	Milímetro por año
mm/h	Milímetro por hora
'	Minutos
N	Norte
F	Número de Froude
W	Oeste
P	Perímetro
“	Segundo

**S**

Sur

**V**

Velocidad

## GLOSARIO

<b>AASHTO</b>	Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte ( <i>American Association of State Highway and Transportation</i> ).
<b>Amenaza</b>	Peligro inminente que surge de un hecho que aún no ha sucedido, pero que de concretarse aquello que se dijo que iba a ocurrir, perjudicará a una o a varias personas en particular.
<b>Área</b>	Medida de extensión de una superficie, expresada en unidades de medida denominadas unidades de superficie.
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
<b>B</b>	Ancho medio de una cuenca.
<b>Borda</b>	Estructuras de tierra que se construyen a lo largo de ríos con el objetivo de confinar el escurrimiento que sobresale de las márgenes durante crecidas, protegiendo la llanura de inundación contra el desbordamiento del río.
<b>Cauce</b>	Depresión del terreno en donde circula agua.

<b>Caudal</b>	Cantidad de un fluido que avanza en una unidad de tiempo.
<b>CONRED</b>	Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres.
<b>Cuantiles</b>	Son los valores de la variable que, ordenados de menor a mayor, dividen la distribución en partes, de tal manera que cada una de ellas contiene el mismo número de frecuencias.
<b>Cuenca</b>	Área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua.
<b>Dragados</b>	Operación de limpieza de rocas y sedimentos en lagos, bahías o accesos a puertos. Se efectúan para aumentar la profundidad de un canal navegable o de un río, con el fin de aumentar la capacidad de transporte de agua, evitando así las inundaciones aguas abajo.
<b>g</b>	Aceleración de la gravedad.
<b>D</b>	Equidistancia entre curvas de nivel de un mapa topográfico.
<b>H</b>	Energía específica.

<b>HEC-RAS</b>	<i>Hydrologic Engineering Center River Analysis System.</i>
<b>Hidrografía</b>	Ciencia que consiste en la descripción y estudio de los cuerpos de agua planetarios, especialmente de los recursos hídricos continentales.
<b>Hidrología</b>	Ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades físicas y químicas, y su relación con el medio ambiente, incluyendo seres vivos.
<b>IGN</b>	Instituto Geográfico Nacional.
<b>INSIVUMEH</b>	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
<b>Inundación</b>	Cuando el agua ocupa zonas que habitualmente están libres de la misma, se da por desbordamientos de cuerpos de agua como ríos o mares.
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar.
<b>Nivel freático</b>	Lugar en el que se encuentra el agua subterránea. En este nivel la presión de agua del acuífero es igual a la presión atmosférica.
<b>Precipitación</b>	Es toda forma de humedad que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie del suelo.

<b>Q</b>	Caudal.
<b>Ramificación</b>	Corriente principal de un río que crea una dirección diferente al río ya existente.
<b>Riesgo</b>	Medida de la magnitud de los daños frente a una situación peligrosa.
<b>Vertiente</b>	Superficie topográfica con pendiente considerada, situada entre los puntos altos y los bajos.
<b>y</b>	Tirante de agua.
<b>Y</b>	Energía cinética.
<b>Z</b>	Energía potencial.

## **RESUMEN**

La cuenca del río Muluá se encuentra ubicada en el municipio de Santa Cruz Muluá, departamento de Retalhuleu, forma parte de la vertiente del océano Pacífico, en donde las lluvias en la región alcanzan los niveles más altos del país, desde junio hasta septiembre.

Gran parte de las poblaciones en esta región son afectadas de manera recurrente debido al rango anual de precipitación que reciben, generando inundaciones en gran parte del territorio, poniendo en riesgo vidas e infraestructuras de viviendas.

El propósito de este estudio es la identificación de zonas de inundación en el área de Santa Cruz Muluá para proponer y diseñar adecuadas obras de protección. Para ello se da una panorámica de las características físicas e hidromorfológicas de la cuenca del río Muluá y características del caudal, analizando dos métodos para la identificación de crecidas. El primero es denominado método racional, el cual permite calcular los caudales de avenida en cuencas pequeñas y se compara con el método denominado análisis regional de crecidas de la república de Guatemala, desarrollado por el INSIVUMEH, para caudales calculados con varios períodos de retorno.

Finalmente, se realizó la simulación hidráulica con los caudales generados por el método racional, ubicando las zonas en riesgo de inundación, proponiendo bordas para contener las inundaciones en el área de estudio.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Identificar las zonas de inundación en Santa Cruz Muluá, Retalhuleu, causadas por el río Muluá y proponer obras de protección contra inundaciones en el área.

### **Específicos**

1. Determinar, por medio de un estudio hidrológico, el caudal máximo del río Muluá.
2. Realizar una simulación hidráulica en el río Muluá, utilizando el programa HEC-RAS, para determinar las zonas de mayor inundación.
3. Proponer obras de protección para minimizar o evitar los daños ocasionados por las inundaciones.
4. Realizar una simulación hidráulica del área, corroborando la efectividad de las obras propuestas.



## INTRODUCCIÓN

Una de las amenazas constantes en Guatemala son los fenómenos naturales debido a las condiciones de alta vulnerabilidad en el país y por el gran rango anual de precipitación que se recibe. Por ello los ríos se desbordan, generando con frecuencia inundaciones que ponen en peligro la vida humana.

En consecuencia, las comunidades que se encuentran aledañas a los ríos son las más afectadas, como es el caso de Santa Cruz Muluá, en Retalhuleu, la cual ha sido afectada por las crecidas del río Muluá.

Por ello, mediante un estudio hidrológico en el área de la cuenca del río Muluá y un estudio hidráulico del río, se busca determinar áreas de mayor vulnerabilidad, y proponer obras de protección que permitan la prevención de inundaciones futuras.



# 1. CONCEPTOS GENERALES

## 1.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico describe el movimiento continuo y cíclico del agua en la Tierra. En el ciclo el agua puede cambiar su estado entre líquido, sólido o gaseoso, como su forma, en agua superficial y agua subterránea. Las fases pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años.

El ciclo hidrológico no tiene ni principio ni fin; su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre, como los ríos, lagos y mares, se evapora por el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor resultante se eleva y se transporta a la atmósfera, tomando forma de nubes.

En determinadas condiciones, las nubes se condensan y caen hacia la tierra en forma de precipitación. La precipitación que cae sobre la tierra se dispersa de diversas maneras. La mayor cantidad de esta es retenida temporalmente por el suelo, y regresa eventualmente a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas.

Otra porción de agua que se precipita viaja sobre la superficie del suelo o a través de este hasta alcanzar los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. La porción restante penetra más profundamente en el suelo para ser parte del suministro de agua subterránea.

## **1.2. Fases del ciclo hidrológico**

Se destacan cuatro fases básicas: precipitación, evaporación y transpiración, escorrentía superficial y agua subterránea.

### **1.2.1. Precipitación**

Se conoce como el vapor de agua condensado, que cae a la superficie de la tierra. La mayor parte se produce como lluvia, aunque también incluye la nieve, el granizo, el goteo de la niebla, los copos de nieve y la aguanieve.

### **1.2.2. Evaporación y transpiración**

Esta fase del ciclo hidrológico es en la cual la precipitación que llega a la superficie de la tierra retorna a la atmósfera en forma de vapor. De la precipitación que cae en dirección a la de la tierra, una parte se evapora antes de llegar al suelo.

La evaporación es la transformación del agua líquida en gas cuando se mueve desde la tierra o las fuentes de agua hacia la atmósfera. La fuente de energía para la evaporación es, principalmente, la radiación solar.

Es uno de los mecanismos principales, por medio del cual el agua se precipita sobre la superficie del suelo y regresa a la atmósfera. Del agua absorbida por el sistema de raíces de una planta, solo una porción minúscula permanece en los tejidos de la planta. Se puede decir que toda el agua retorna a la atmósfera en forma de vapor, debido a la transpiración.

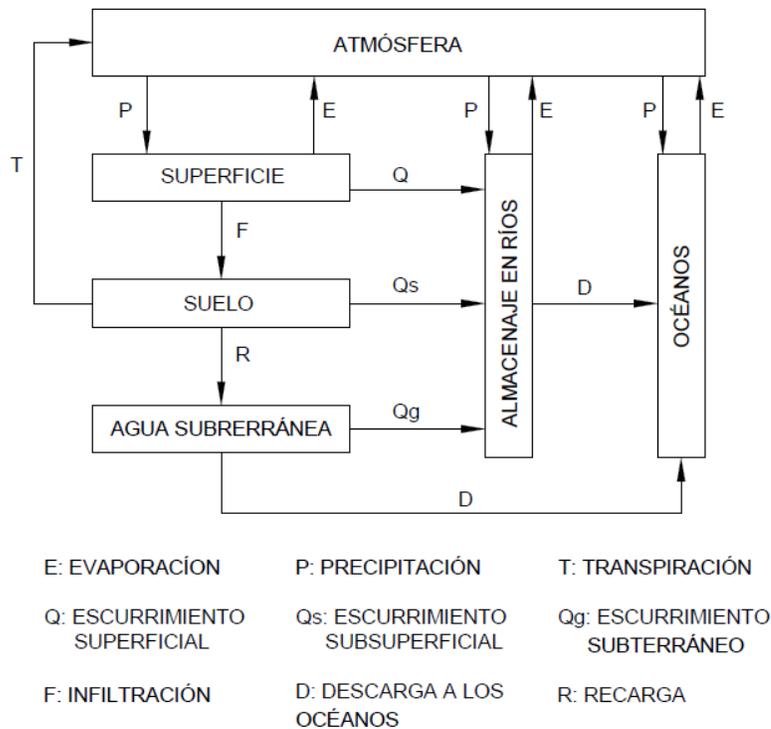
### 1.2.3. Escorrentía superficial

Es la variedad de rutas por las cuales se mueve el agua a través del suelo. Incluye, tanto la escorrentía superficial como la escorrentía a través de canales. Cuando fluye, el agua puede infiltrarse en la tierra, evaporarse en el aire, almacenarse en lagos o embalses, o ser extraída para usos humanos.

### 1.2.4. Infiltración

Es el agua de la superficie que penetra en el suelo. Una vez infiltrada, el agua pasa a formar parte de la humedad del suelo o del agua subterránea.

Figura 1. Ciclo hidrológico



Fuente: elaboración propia, basada en VILLÓN BÉJAR, Máximo. *Hidrología*. p. 17

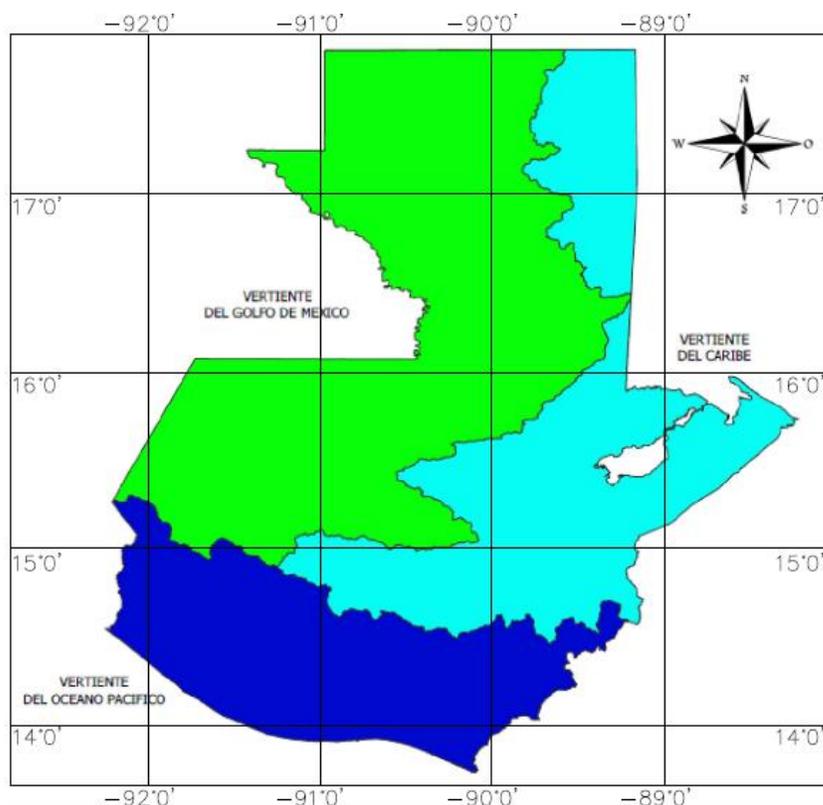
### **1.3. Hidrografía de Guatemala**

En Guatemala, se ha estimado que el 41 por ciento del agua de lluvia escurre superficialmente y llega a los océanos, principalmente en forma de corrientes de agua que ocurren por todo el territorio nacional en tres grandes vertientes, de acuerdo con el punto donde desembocan finalmente todos los ríos que atraviesan o nacen en el país.

En forma general, los ríos en una misma vertiente son similares, para cada vertiente hay condiciones propias que afectan las características de los ríos que están incluidos en ella.

Guatemala cuenta con tres regiones hidrográficas o vertientes desde el punto de vista donde desembocan los ríos: vertiente del océano Pacífico, vertiente del golfo de México y vertiente del Caribe, las cuales se muestran en la figura 2.

Figura 2. **Vertientes de Guatemala**



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis.

La vertiente del océano Pacífico ocupa el 25 por ciento en ríos del país, su rango de precipitaciones se encuentra entre los 1 500 a 4 500 milímetros anuales. La vertiente del Caribe se caracteriza por tener el río más largo del país (río Motagua con 486 550 kilómetros), sus pendientes son más suaves y su desarrollo es menos brusco, por ello las crecidas son de menos duración y los caudales son más constantes durante todo el año. La vertiente del Golfo de México contiene ríos de grandes longitudes, incluidos los ríos más caudalosos del país, como el Usumacinta, el Chixoy y el río La Pasión; sus crecidas son de larga duración.

## **1.4. Componentes básicos del riesgo**

El riesgo es la probabilidad de que una amenaza se convierta en un desastre. La vulnerabilidad o las amenazas, por separado, no representan un peligro. Pero si se juntan, se convierten en un riesgo, o sea, en la probabilidad de que ocurra un desastre.

### **1.4.1. Riesgo**

Una situación de riesgo es la acción de poner en situación de peligro a bienes o personas que son vulnerables. Puede cuantificarse como las pérdidas esperadas debido a un tipo de riesgo potencial en una situación dada y en un período de referencia.

### **1.4.2. Amenaza**

Las amenazas son un peligro que afronta una comunidad, el cual resulta de la ocurrencia de un fenómeno natural (inundación, terremoto). Se determina mediante su probabilidad de ocurrencia y la severidad con la cual se manifiesta en ciertos lugares.

La ocurrencia refleja la historia de un evento y la probabilidad de un evento amenazante sobre el cual una comunidad o población no tenga conocimiento, porque no se tiene un antecedente histórico o porque ha ocurrido hace más de una generación y, por lo tanto, no es recordado.

La severidad de las amenazas naturales se mide usualmente para un lugar específico, aplicado escalas específicas, por ejemplo, nivel de inundación para un período de retorno de 100 años.

### **1.4.3. Vulnerabilidad**

La vulnerabilidad es el riesgo de sufrir pérdidas como resultado de un fenómeno potencialmente perjudicial. Es una medida agregada del bienestar humano que integra la exposición medioambiental, social, económica y política a un abanico de perturbaciones dañinas.

### **1.4.4. Desastre**

Un desastre es una situación de daño grave que altera la estabilidad y condiciones de vida en una comunidad o población dada, ante la presencia de una energía o fuerza potencialmente peligrosa.

### **1.4.5. Inundación**

Puede definirse como una invasión de las tierras situadas junto a un cauce por el desbordamiento de sus aguas, debido a crecidas del caudal, causado por lluvias abundantes.

#### **1.4.5.1. Tipos de inundación**

El tipo de inundación más ocurrente en el país es el de las inundaciones fluviales y las causadas por la falla de los sistemas de alcantarillado pluvial de los municipios que no cuentan con la capacidad para los caudales propios de las lluvias intensas.

#### **1.4.5.2. Desbordamiento de un cauce**

Se da como consecuencia de una crecida. Consiste en la ampliación temporal del lecho fluvial, el río ocupa su llanura de inundación o cauce mayor.

#### **1.4.5.3. Insuficiencia de drenaje del agua precipitada**

El agua permanece varios días hasta que se evapora o se infiltra. Se da, sobre todo, en determinadas superficies como terrenos impermeables, zonas urbanas, aéreas endorreicas, y otras.

#### **1.4.5.4. Consecuencias de las inundaciones**

Las inundaciones constituyen fenómenos físicos y socioeconómicos que afectan las actividades humanas.

Hay que destacar que la existencia de inundaciones puede ser beneficiosa para el hombre, incrementa la fertilidad del suelo, limpia cauces, renueva aguas estancadas y acuíferos aprovechables o riesgo con aguas de avenida en zonas deficitarias.

Sin embargo, las consecuencias son, en su mayor parte negativas, y pueden ocasionar daños en infraestructuras como vías de comunicación, viviendas, edificaciones agrícolas, puentes. Repercusiones en actividades humanas como la paralización de actividades, pérdidas económicas, gastos económicos en reparaciones, limpieza general, epidemias y problemas de salud pública por expansión de contaminantes, corte de agua potable, falta de

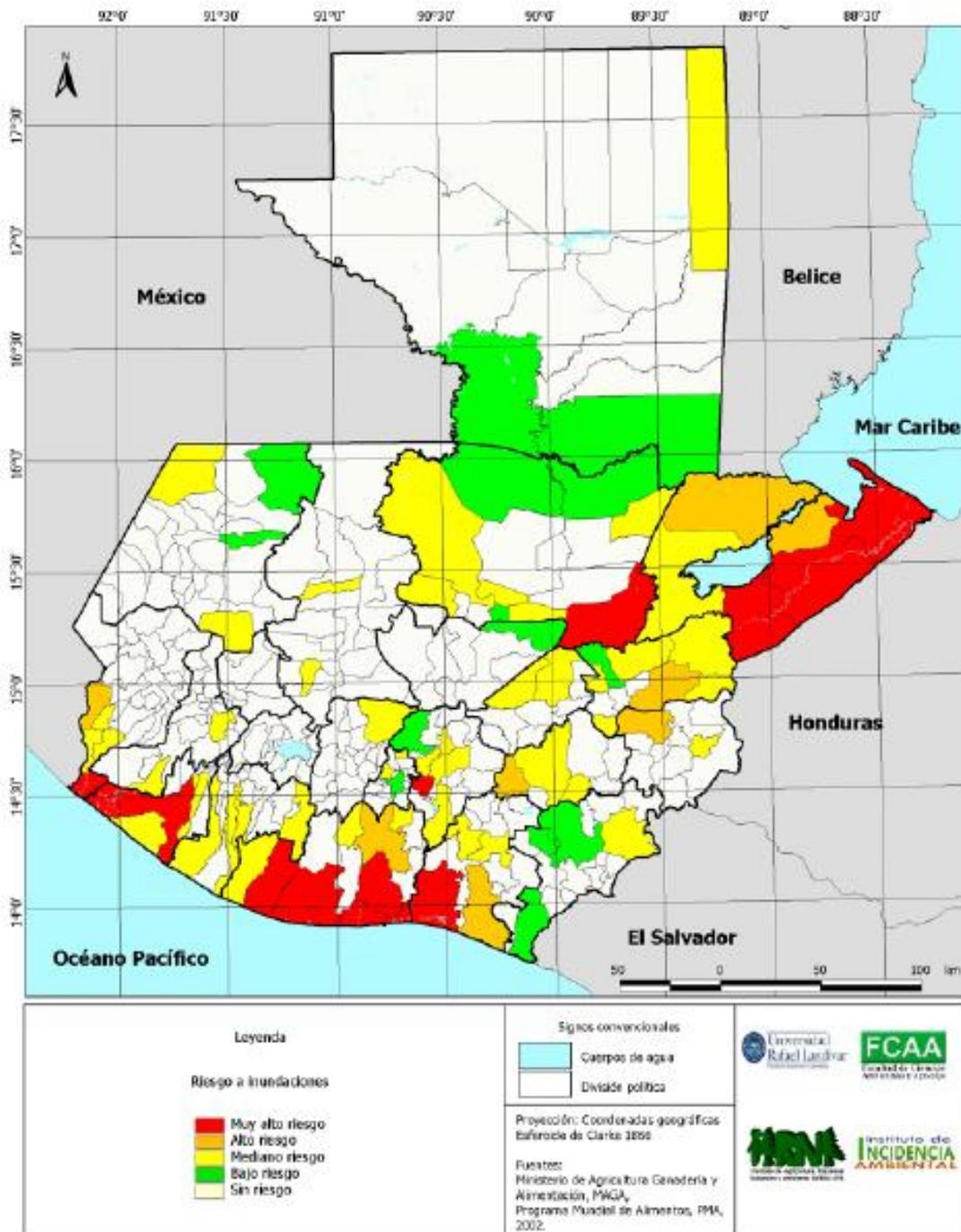
abastecimiento y la pérdida de vidas humanas, tanto directa como indirectamente.

### **1.5. Potenciales amenazas hidrometeorológicas que afectan a Guatemala**

Guatemala es afectada de manera recurrente por eventos de tipo hidrometeorológico, como huracanes, lluvias intensas, temporales y su influencia en las inundaciones y deslizamientos. Según el Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, IARNA (2004), existen en Guatemala las zonas de “extremadamente alta” y “muy alta” amenaza, debido al rango anual de precipitación que reciben.

Se estima que 1 733 poblados con aproximadamente 210 mil personas se encuentran vulnerables a las inundaciones, según el documento citado en el párrafo anterior. En la figura 3 se muestra el mapa de riesgo de inundaciones.

Figura 3. Mapa de riesgo a inundaciones

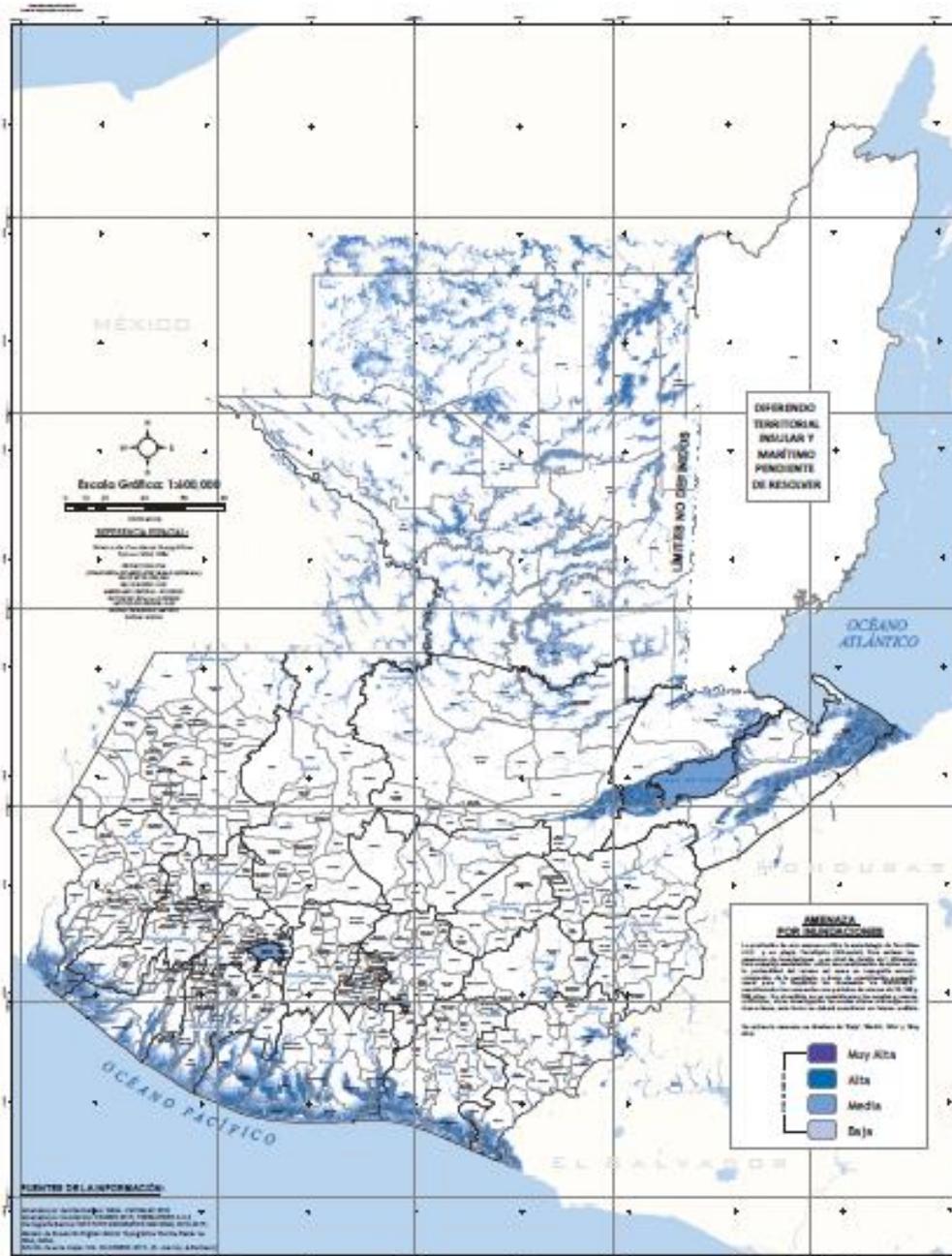


Fuente: IARNA. *Perfil Ambiental de Guatemala*. p. 335.

En un análisis realizado sobre los puntos de inundación registrados por la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED) desde 1996 a 2000 se obtuvieron los siguientes resultados:

- Existe una consistencia en la ocurrencia de eventos basados en la pendiente del área; 82,4 % de los eventos ocurrió en áreas con pendientes menores al 8 %.
- La vertiente del Pacífico presenta la mayor ocurrencia de eventos con un 60 %, seguida por la vertiente del mar Caribe con un 36 % y el 4% restante ocurrió en la vertiente del golfo de México.
- La mayor cantidad de eventos ocurrió en la segunda mitad del invierno; el 65,6 % entre agosto y septiembre.
- Las cuencas más afectadas fueron las de los ríos María Linda, Motagua, Archiguate y Coyolate.

Figura 4. **Mapa de amenaza por inundaciones de la república de Guatemala**



Fuente: CONRED. (2015). *Amenaza por inundaciones Republica de Guatemala*. [Figura].  
 Recuperado de: <https://conred.gob.gt>

Los registros de inundación de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED), en Retalhuleu, indican que el 17 de noviembre de 2017, en el municipio de Santa Cruz Muluá, el río Muluá presentó una crecida que provocó daños en el centro de salud del lugar y en infraestructuras del área.



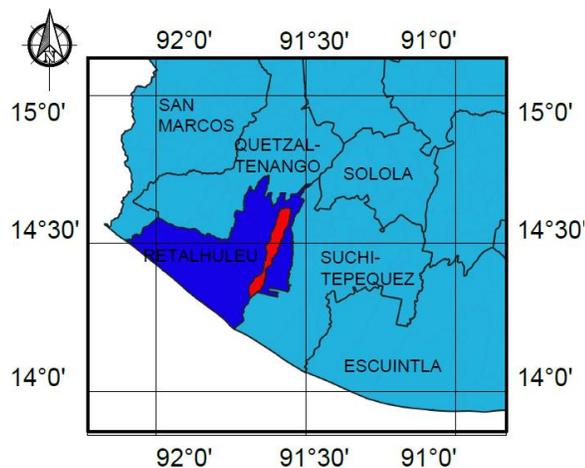
## 2. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO MULUÁ

Cuenca es la superficie de terreno limitada por la divisoria de aguas, una línea imaginaria que pasa por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de estudio de otras cuencas. A partir de esta, la precipitación caída drena por un mismo punto de salida.

### 2.1. Ubicación geográfica de la cuenca

La cuenca del río Muluá está ubicada en el municipio de Santa Cruz Muluá, departamento de Retalhuleu, forma parte de la cuenca del río Samalá y de la vertiente del océano Pacífico, en la figura 5 se puede apreciar con rojo el municipio de Santa Cruz Muluá y en la figura 6 la localización de la cuenca.

Figura 5. **Mapa de localización del municipio de Santa Cruz Muluá en Retalhuleu**

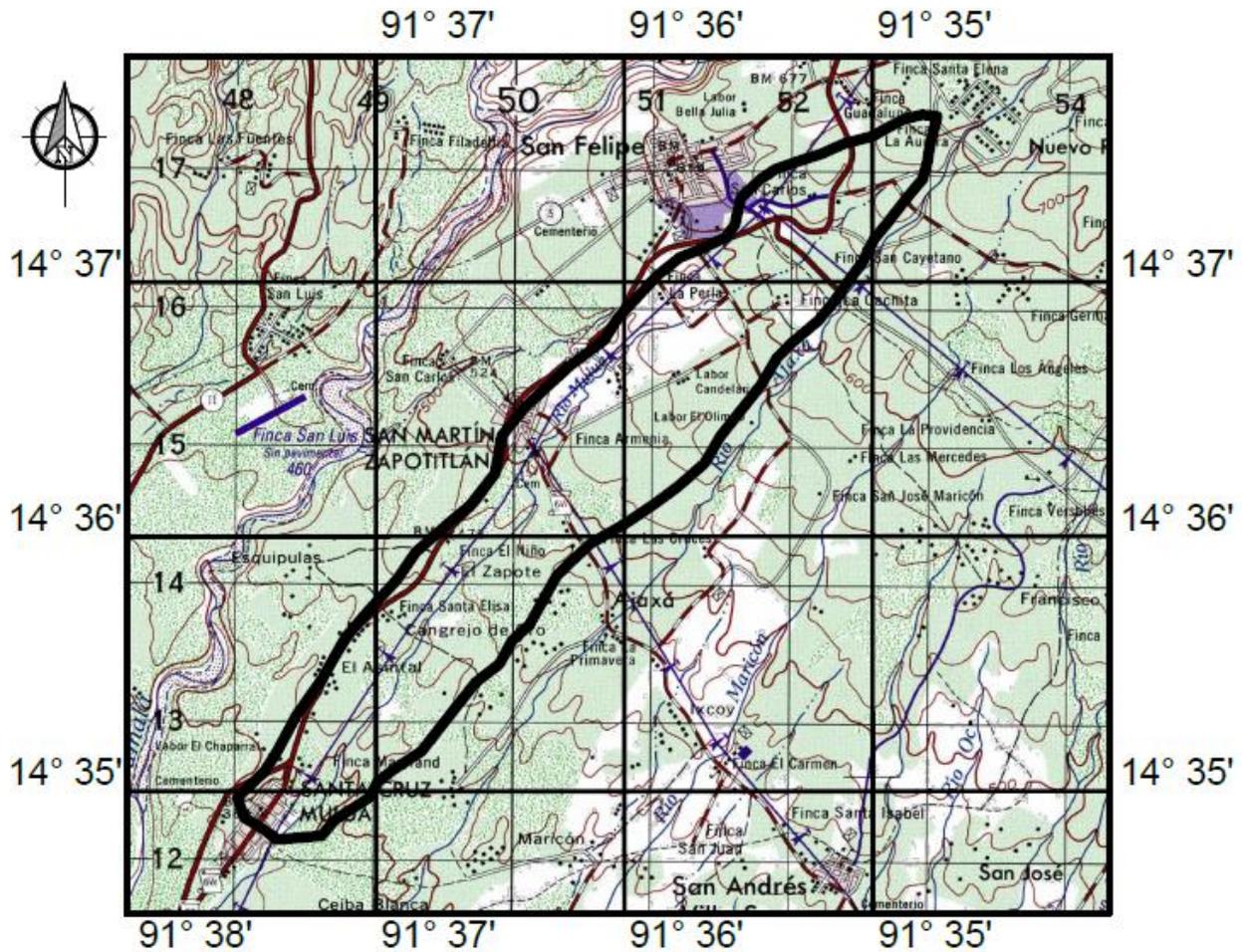


Fuente: elaboración propia, empleando el programa Qgis.

Para este estudio se determinó la cuenca que aporta hasta el municipio de Santa Cruz Muluá, más adelante se determina una serie de características morfométricas.

La cuenca se encuentra comprendida entre los meridianos  $91^{\circ}37'$  y  $91^{\circ}35'$  longitud oeste y los paralelos  $14^{\circ}35'$  y  $14^{\circ}38'$  latitud norte.

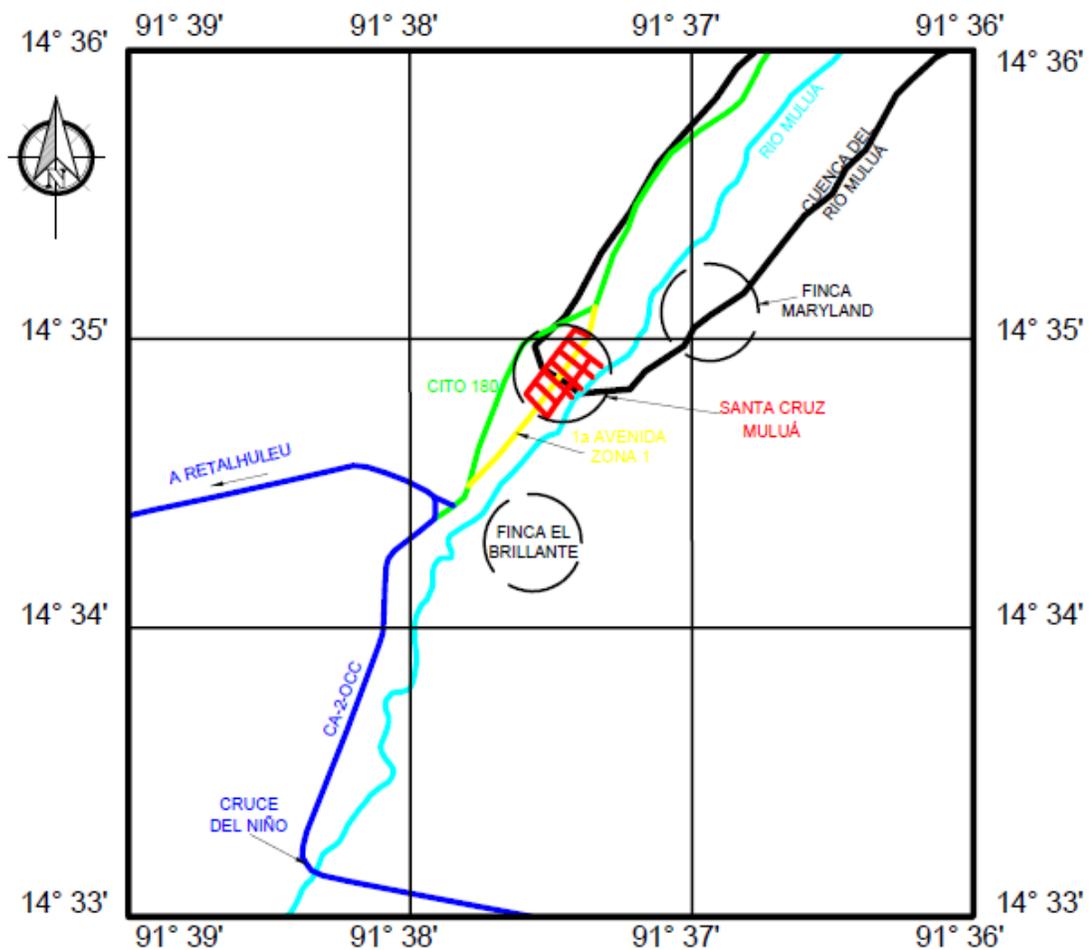
Figura 6. **Mapa de localización de la cuenca del río Muluá**



Fuente: elaboración propia, con base a recorte de mapa cartográfico con nombre Retalhuleu, escala 1:50000, proporcionado por el IGN.

Como se puede apreciar en la figura 7, Santa Cruz Muluá (rojo) se ubica a orillas del río Muluá (celeste), a su vez la ruta CITO 180 (verde) que conecta a Retalhuleu con Quetzaltenango se ubica a un costado del río, como lo hace también la 1ª avenida de la zona 1 (amarillo) de Santa Cruz Muluá. El río Muluá desemboca en el río Samalá, justo después de pasar el cruce del Niño, como lo conocen los lugareños, sobre la CA-2-Occ (azul).

Figura 7. **Mapa de localización de Santa Cruz Muluá**



Fuente: elaboración propia, con base a recorte de mapa cartográfico con nombre Retalhuleu, escala 1:50000, proporcionado por el IGN.

## **2.2. Delimitación de la cuenca**

La cuenca está delimitada al noroccidente por San Martín Zapotitlán y el río Samalá; al oriente, el río Ajaxá; al norte, San Felipe; al sur, San Sebastián.

## **2.3. Determinación de los parámetros morfométricos de la cuenca**

Para el estudio y determinación de los parámetros geomorfológicos se precisa de información cartográfica de la topografía de la zona de estudio. En este caso se utilizaron mapas a escala 1:50 000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Entre los parámetros morfométricos de la cuenca del río Muluá en el municipio de Santa Cruz Muluá, Retalhuleu, se puede mencionar:

### **2.3.1. Área y perímetro de la cuenca de estudio**

El área de la cuenca de estudio (A), se determinó mediante el programa AutoCAD; sus dimensiones se expresan en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>) y en hectáreas (Ha):

$$A = 6,143 \text{ km}^2$$

$$A = 614,300 \text{ Ha}$$

El perímetro de la cuenca de estudio (P), se determinó mediante el programa AutoCAD; sus dimensiones se expresan en kilómetros (km):

$$P = 15,067 \text{ km}$$

### **2.3.2. Forma de la cuenca**

Dada la importancia de la configuración de la cuenca, es conveniente cuantificar estas características por medio de índices o coeficientes, relacionando así el movimiento del agua superficial y las diferentes respuestas de la cuenca a dicho movimiento.

#### **2.3.2.1. Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad**

Es la relación que existe entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de la circunferencia de área igual a la cuenca. El coeficiente de compacidad se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$K_c = \frac{P \text{ cuenca}}{P \text{ círculo}}$$

En donde:

$K_c$  = coeficiente de compacidad

$P$  cuenca = perímetro de la cuenca medido en kilómetros (km)

$P$  círculo = perímetro del círculo medido

El índice, trata de expresar la influencia del perímetro y el área de una cuenca en la escorrentía. Si  $K=1$ , la cuenca será de forma circular, por lo general, para cuencas alargadas se espera que  $K>1$ . Las cuencas de forma alargada, reducen las probabilidades, de que sean cubiertas en su totalidad por una tormenta, lo que afecta el tipo de respuesta que se presenta.

- Área de la circunferencia

$$A = \pi * r^2$$

- Radio en función del área y  $\pi$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$K = \frac{P \text{ cuenca}}{2\pi \sqrt{\frac{A}{\pi}}}$$

El coeficiente de compacidad de la cuenca de estudio es  $K_c = 1,7149$ .

### 2.3.2.2. Factor de forma

Expresa la relación existente entre el área de la cuenca, y un cuadrado de la longitud del cauce principal de la cuenca.

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

En donde:

$K_f$  = factor de forma

$A$  = área de la cuenca medida en kilómetros cuadrados ( $\text{km}^2$ )

$L$  = longitud del cauce principal de la cuenca medido en kilómetros (km)

Una cuenca tenderá a ser alargada si el factor de forma se aproxima a cero; mientras que su forma es redonda, en la medida que el factor de forma tiende a uno. Este factor es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial en una cuenca. El factor de forma de la cuenca de estudio es 0,1227.

### **2.3.3. Características de relieve**

Los parámetros relativos al relieve tienen mayor influencia sobre la respuesta hidrológica que los parámetros de forma. Mediante sus características de relieve se puede saber si un río es joven, maduro o viejo, y si pueden emerger nuevos cauces, se puede conocer también la variación de su caudal en el tiempo.

#### **2.3.3.1. Pendiente media de la cuenca**

Se refiere al grado de inclinación del terreno expresado en porcentaje, los rangos de pendientes son variables dentro de una cuenca hidrográfica.

$$S = \frac{D * L_I}{A}$$

En donde:

S= pendiente media de la cuenca

D= equidistancia entre curvas de nivel (km)

Li= longitud total de todas las curvas de nivel comprendidas en la cuenca (km)

A= área de la cuenca en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>)

Tabla I. **Cálculo de pendiente media de la cuenca del río Muluá**

Cálculo de la pendiente media de la cuenca				
Cota (m)	Longitud (km)	Equidistancia (km)	Área de la cuenca(km <sup>2</sup> )	Pendiente media (S)
700	0,21	0,02	6,14	0,0007
680	0,48	0,02	6,14	0,0016
660	1,33	0,02	6,14	0,0043
640	1,31	0,02	6,14	0,0043
620	1,22	0,02	6,14	0,0040
600	1,52	0,02	6,14	0,0049
580	2,00	0,02	6,14	0,0065
560	2,55	0,02	6,14	0,0083
540	1,86	0,02	6,14	0,0061
520	1,83	0,02	6,14	0,0060
500	1,44	0,02	6,14	0,0047
480	1,85	0,02	6,14	0,0060
460	1,50	0,02	6,14	0,0049
440	2,49	0,02	6,14	0,0081
420	2,04	0,02	6,14	0,0066
400	2,59	0,02	6,14	0,0084
Sumatoria porcentaje de pendiente media de la cuenca				0,0854

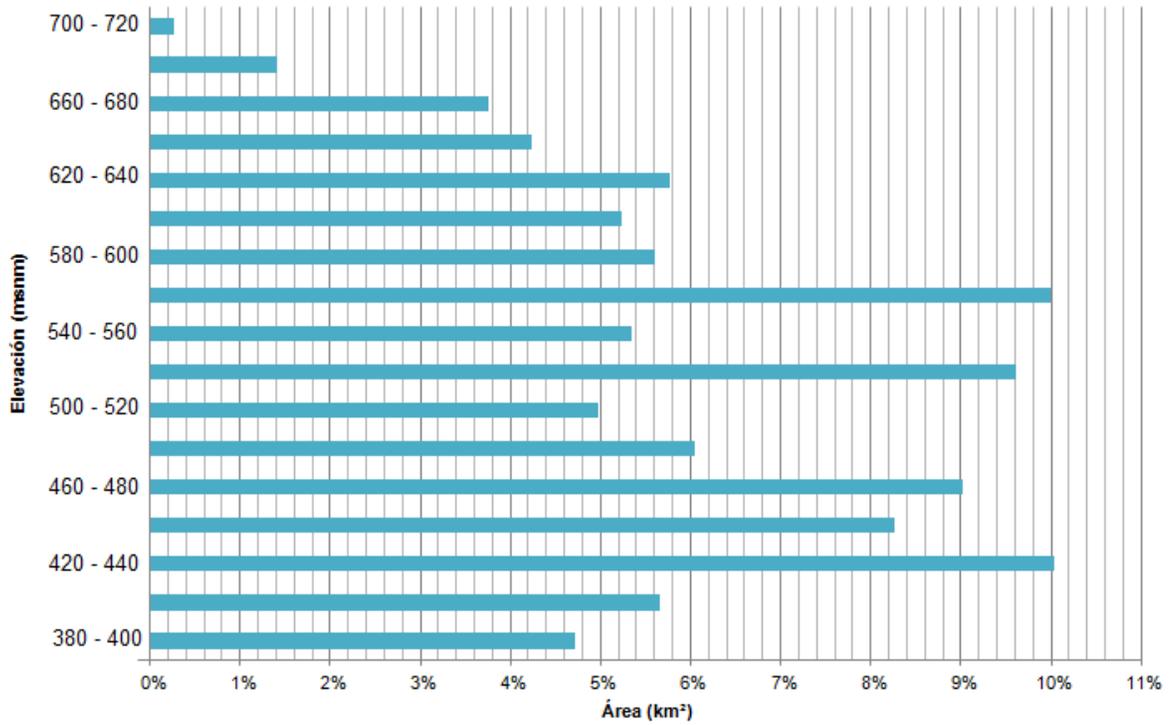
Fuente: elaboración propia.

Con los datos de la cuenca, el resultado de la pendiente media de la cuenca de estudio es de 8,54 %.

### 2.3.3.2. Histograma de frecuencias altimétricas

Es un histograma que indica el porcentaje de área comprendida entre dos alturas determinadas. En la figura 8 se representa el histograma de frecuencias altimétricas de la cuenca del río Muluá.

Figura 8. **Histograma de frecuencias altimétricas**



Fuente: elaboración propia.

### 2.3.3.3. **Curva hipsométrica**

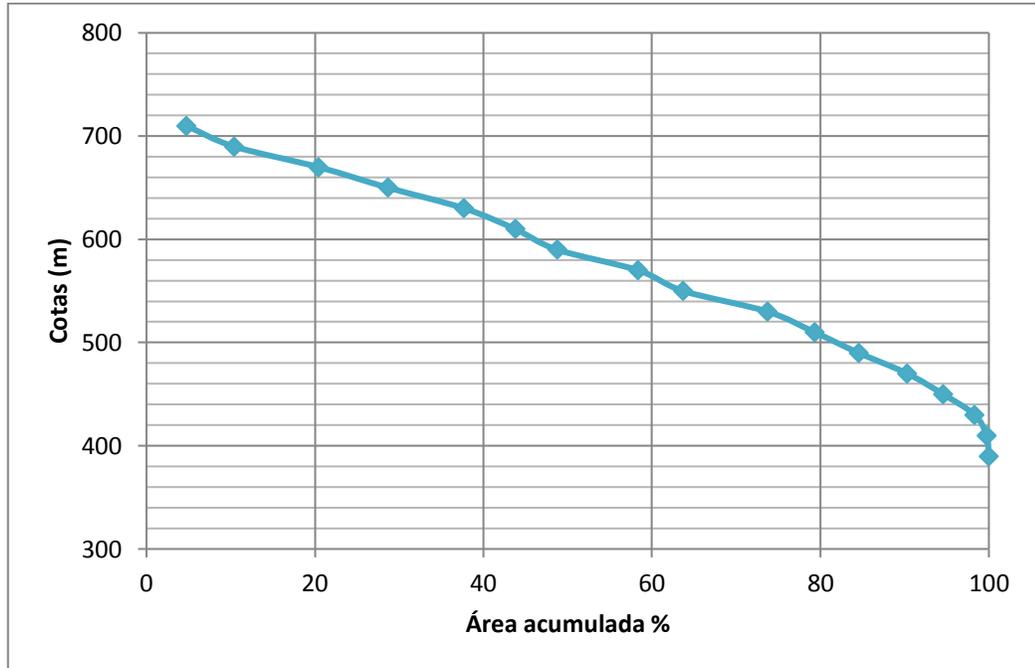
Es la representación gráfica del relieve de la cuenca. Es una curva que indica el porcentaje de área de la cuenca, en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>), que existe por encima de una cota determinada.

Tabla II. **Cálculo de la curva hipsométrica**

Curva hipsométrica de la cuenca y determinación del valor de la altitud media (m.s.n.m), analítica y gráficamente						
Intervalo entre curvas de nivel (m)	Cota media (Ci) en metros	Área en (ai) en km <sup>2</sup>	Área (ai) / Área cuenca (%)	Porcentaje de área acumulado (%)	$\Sigma (Ci * ai)$	
380   400	390	0,29	4,72	4,72	113,06	
400   420	410	0,35	5,65	10,37	142,35	
420   440	430	0,62	10,04	20,41	265,18	
440   460	450	0,51	8,27	28,68	228,65	
460   480	470	0,55	9,01	37,70	260,24	
480   500	490	0,37	6,05	43,75	182,13	
500   520	510	0,31	4,98	48,73	156,06	
520   540	530	0,59	9,62	58,35	313,12	
540   560	550	0,33	5,34	63,70	180,57	
560   580	570	0,61	10,01	73,70	350,32	
580   600	590	0,34	5,61	79,31	203,20	
600   620	610	0,32	5,23	84,54	195,81	
620   640	630	0,35	5,77	90,30	223,27	
640   660	650	0,26	4,25	94,55	169,52	
660   680	670	0,23	3,76	98,31	154,57	
680   700	690	0,09	1,42	99,73	60,17	
700   720	710	0,02	0,27	100,00	11,93	
<b>Suma</b>		<b>6,14</b>	<b>100,00</b>		<b>3 210,15</b>	
$H = \Sigma (Ci * ai) / A$		522,57	Msnm			

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Curva hipsométrica**



Fuente: elaboración propia.

#### **2.3.3.4. Pendiente del cauce principal**

Es un indicador del grado de respuesta hidrológica de la cuenca a una tormenta. Asimismo, este parámetro permite evaluar el potencial erosivo a partir de la velocidad del flujo, lo que permite conocer las características adecuadas para la estabilización del cauce.

La pendiente del cauce principal está referida al nivel del mar, puede estimarse con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{H}{L} * 100$$

En donde:

S= pendiente del cauce principal que es adimensional

H= desnivel entre los extremos del cauce

L= longitud del cauce principal de la cuenca medido en kilómetros (km)

$$S = \frac{660m - 385m}{6\,984,35\,m} * 100$$

$$S = 3,94 \%$$

La pendiente del cauce principal es de 3,94 %.

#### **2.3.4. Características de la red de drenaje**

Las características de la red de drenaje permiten deducir la interacción entre el sistema fluvial y las demás características ambientales del territorio de la cuenca.

##### **2.3.4.1. Orden de la cuenca**

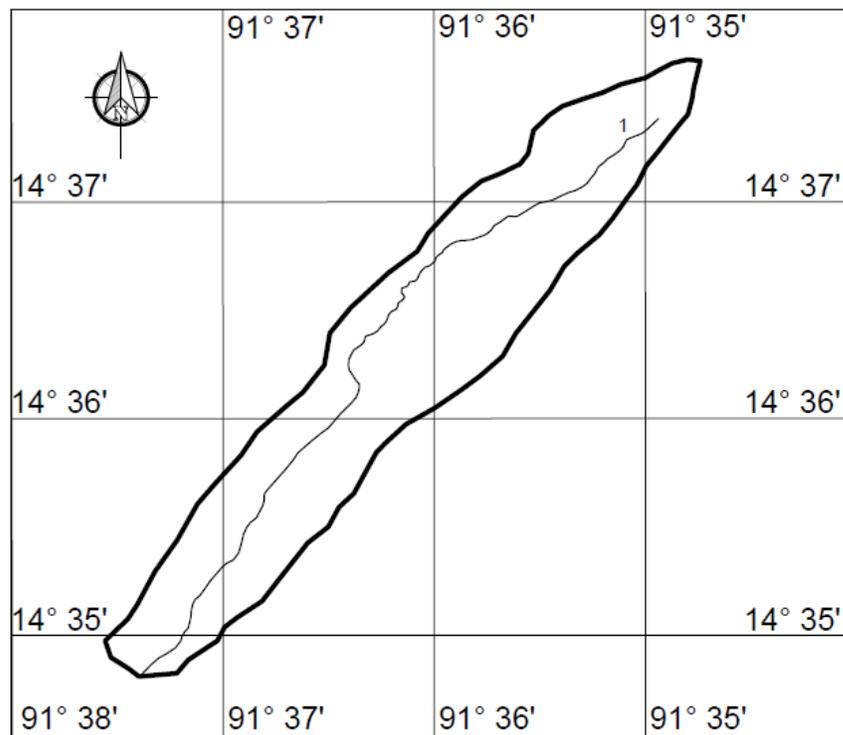
La conexión de los ríos en una cuenca influye en la respuesta ante un evento de precipitación. Se emplean distintos parámetros que tratan de cuantificar la influencia de la forma del drenaje.

Se definen como corrientes de primer orden aquellos pequeños canales que no tienen corrientes tributarias, corrientes de segundo orden se forman cuando se unen dos corrientes de primer orden. Corrientes de tercer orden se forman

cuando se unen dos corrientes de segundo orden; corrientes de orden n se forman cuando se unen dos corrientes de orden n-1.

En la figura 10 se muestra la distribución de los ríos de la cuenca del río Muluá. Con base en el análisis realizado se determinó que el orden de la cuenca del río es 1.

Figura 10. **Orden de la cuenca del río Muluá**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

#### **2.3.4.2. Densidad de drenaje**

Se define como la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca y su área total. Los valores bajos de esta relación generalmente están

asociados con regiones de alta resistencia a la erosión, muy permeables y de bajo relieve. Los valores altos son encontrados en regiones de suelos impermeables, con poca vegetación y de relieve montañoso.

$$D = \frac{\sum L_i}{A}$$

Donde:

D = densidad de drenaje (km/km<sup>2</sup>)

$\sum L_i$  = es la suma de todas las longitudes del cauce (km)

A = es el área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$$D = \frac{6,98 \text{ km}}{6,14 \text{ km}^2}$$

Utilizando los datos de la cuenca de estudio, se obtiene como resultado una densidad de drenaje de 1,1363 km/km<sup>2</sup>.

### **2.3.4.3. Frecuencias de cauces**

Se define como la relación entre el número de cauces y su área correspondiente. Se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$F = \frac{\sum N_i}{A}$$

En donde:

D = frecuencia de cauces o número de cauces por kilómetro cuadrado

$\Sigma Ni$  = es la suma de todos los cauces

A = es el área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$$F = \frac{1}{6,14 \text{ km}^2}$$

Utilizando los datos de la cuenca de estudio, se obtiene como resultado una frecuencia de cauces de 0,16.

Tabla III. **Resumen de las características morfométricas de la cuenca**

Área (km <sup>2</sup> )	6,14
Perímetro (km)	15,07
Longitud del cauce principal (km)	7,08
Forma de la cuenca	
Índice de compacidad (Kc)	1,71
Factor forma (Kf)	0,12
Características de relieve	
Pendiente media de la cuenca	0,0854
Altitud media (m)	522,57
Pendiente del cauce principal (%)	3,94
Características de la red de drenaje	
Orden de la cuenca	1
Densidad de drenaje (km/km <sup>2</sup> )	1,14
Frecuencia de cauces	0,16

Fuente: elaboración propia.



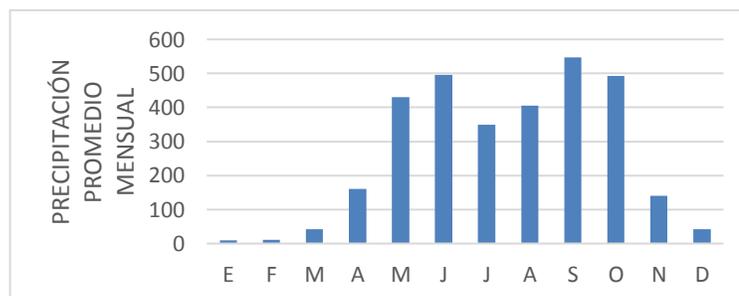
### 3. ANÁLISIS DE CRECIDAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1. Régimen de lluvias en la boca costa

La bocacosta es una región angosta que trasversalmente se extiende desde el departamento de San Marcos hasta el de Jutiapa, situada en la ladera montañosa de la Sierra Madre, en el descenso desde el altiplano hacia la planicie costera del Pacífico, con elevaciones de 300 a 1 400 metros sobre el nivel del mar.

Las lluvias en esta región alcanzan los niveles más altos del país, con máximos pluviométricos de junio a septiembre, los valores de temperatura aumentan a medida que se desciende hacia el litoral del Pacífico. Existe un clima generalizado de género semicálido y sin estación fría bien definida, con carácter de muy húmedo. En la figura 11 se muestra la distribución de lluvia en la estación de Retalhuleu, ubicada a 10 km de Santa Cruz Muluá.

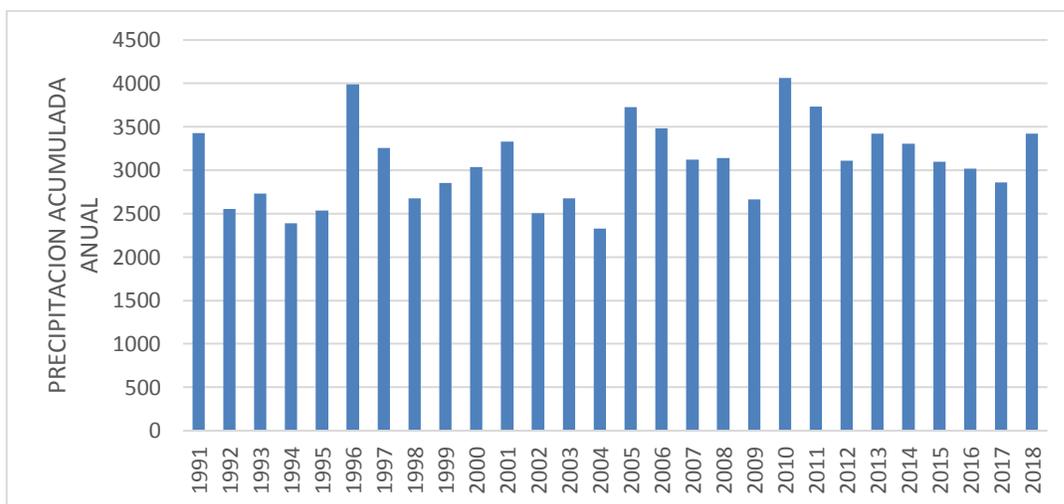
Figura 11. **Distribución de precipitación media mensual, período 1991 a 2018 estación de Retalhuleu**



Fuente: INSIVUMEH.

Se puede observar que en la región se presenta una época lluviosa que se distribuye en los meses de mayo-octubre, presenta dos datos mayores importantes de lluvia en junio, septiembre y octubre.

Figura 12. **Datos de precipitación acumulada anual, período 1991 a 2018 estación de Retalhuleu**



Fuente: INSIVUMEH.

En la figura 12 se observa que la precipitación anual a lo largo del periodo analizado muestra una variabilidad normal del clima, registrándose años secos como en 1994 y 2004, y años muy lluviosos como en 1996 y 2010.

En promedio se puede esperar una lluvia anual de 3 088 milímetros acumulados anuales.

### 3.2. Método racional

Este método permite calcular los caudales de avenida en cuencas pequeñas, a partir de los datos de precipitación y de las condiciones de escorrentía de la cuenca vertiente.

Se utiliza en hidrología para determinar el caudal instantáneo máximo de descarga de una cuenca hidrográfica. La aplicación del método se hace a la pequeña área de la cuenca. La ecuación de este método se presenta así:

$$Q = \frac{(C)(i)(A)}{3,6}$$

Donde:

Q = caudal instantáneo máximo de descarga en metros cúbicos por segundo.

C = coeficiente de escorrentía.

i = intensidad de la precipitación en milímetros por hora.

A = área de la cuenca en kilómetros cuadrados.

Se utiliza el método racional como base para el cálculo de los caudales de diseño en la cuenca del río Muluá. Esta metodología se basa en las siguientes premisas:

- La intensidad de la lluvia es uniforme en el tiempo: es decir, la duración del aguacero es igual al tiempo de concentración de la cuenca, es suficientemente corta como para asumir que la intensidad de lluvia se mantiene constante a lo largo de su duración.

- La intensidad de la lluvia es uniforme en el espacio de la cuenca: las características del aguacero de cálculo son las mismas en toda la superficie de la cueca vertiente.
- En las escorrentías que generan la avenida, domina la escorrentía superficial por falta de infiltración.
- El cauce principal es de pequeño tamaño y no tiene capacidad de almacenamiento de agua.

### **3.2.1. Determinación de la intensidad (i)**

Valor medio a lo largo del intervalo de duración igual al tiempo de concentración.

Se obtiene a partir de las curvas I.D.F., según lo siguiente:

- Obtención de series de intensidades máximas anuales.
- Análisis estadístico de las series para obtener los cuantiles de los distintos periodos de retorno.
- Para cada período de retorno, el conjunto de puntos correspondientes a las distintas duraciones permite obtener la curva deseada.

### **3.2.2. Cálculo de intensidad de lluvia en la cuenca del río Muluá**

Las curvas intensidad – duración – frecuencia (IDF) son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de

diferente duración y correspondientes todos de la misma frecuencia o período de retorno.<sup>1</sup>

Cuando la intensidad de lluvia excede a la capacidad de infiltración del suelo, se presenta el escurrimiento superficial. La capacidad de infiltración del suelo disminuye durante la precipitación, tormentas con intensidad de lluvia relativamente baja, producen un escurrimiento superficial considerable, si su duración es extensa.

- Cálculo de la intensidad de lluvia

$$i = \frac{A}{(B + T_c)^{(n)}}$$

Donde:

A, B y n = son parámetros que están en función del periodo de retorno

T<sub>c</sub> = tiempo de concentración de la cuenca

- Tiempo de concentración de la cuenca<sup>2</sup>

Es el tiempo necesario para que una partícula de agua viaje desde el punto más lejano hasta el punto de control.

$$T_c = \frac{3 * L^{1.15}}{154 * H^{(0.38)}}$$

---

<sup>1</sup> LÓPEZ J.J., DELGADO, O., CAMPO M.A. *Determinación de las curvas IDF en Igueldo-San Sebastián. Comparación de diferentes métodos.* p. 215.

<sup>2</sup> INSIVUMEH. *Estudio de intensidades de precipitación en Guatemala.* agosto de 2002.

Donde:

L= longitud del cauce en metros

Tc = tiempo de concentración de la cuenca en minutos

H = diferencia de niveles del punto más alto de la cuenca con el más bajo,  
en metros

Tabla IV. **Tiempo de concentración de la cuenca**

Tiempo de concentración de la cuenca	
Datos:	
Longitud del cauce	7 075,00 metros
Desnivel	320,88 metros
Tiempo de concentración	58,13 minutos

Fuente: elaboración propia.

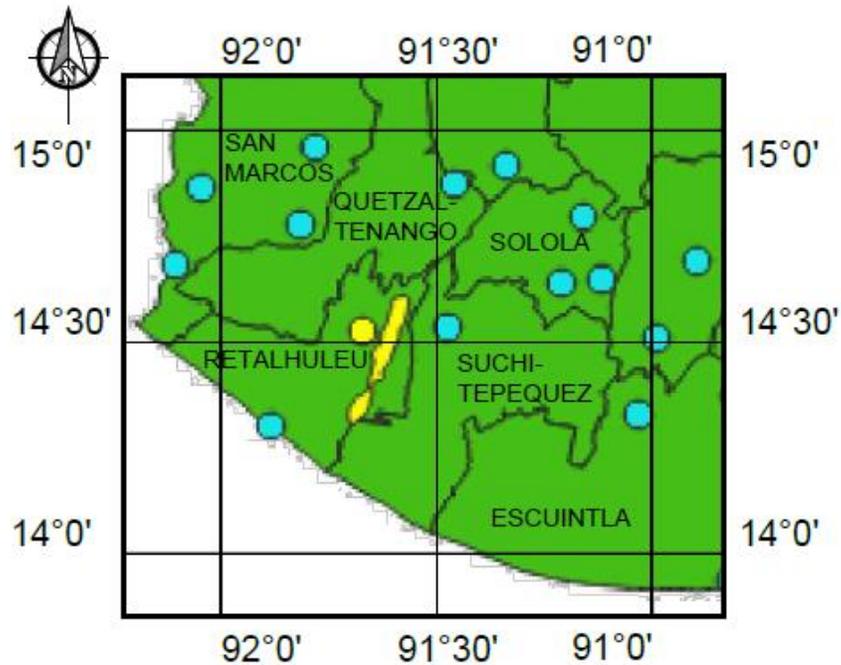
Para obtener un mejor resultado de intensidad de lluvia, se tomarán las curvas intensidad – duración – frecuencia (IDF) de la estación meteorológica de Retalhuleu (ver tabla V). Como se aprecia en la figura 13, es la estación meteorológica más cercana al área de estudio, señala tanto la estación meteorológica como el municipio de Santa Cruz Muluá de color amarillo.

Tabla V. **Curvas de intensidad, duración y frecuencia de la estación meteorológica Retalhuleu**

Pr	2	5	10	20	25	30	50	100
<b>A</b>	5 843	1 991	1 150	1 321	1 315	1 221	1 215	1 217
<b>B</b>	25	14	11	13	13	12	12	12
<b>N</b>	1,037	0,769	0,616	0,633	0,630	0,613	0,610	0,609
<b>R2</b>	0,998	0,988	0,976	0,975	0,975	0,974	0,974	0,974

Fuente: Estudio de intensidades de precipitación en Guatemala, Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), agosto de 2002.

Figura 13. **Estaciones meteorológicas del INSIVUMEH**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa Qgis.

En este estudio se trabajará con caudales con periodos de retorno de 20, 50 y 100 años, con el valor del tiempo de concentración calculado anteriormente y con los datos de la tabla V, se procede a calcular las intensidades con esos periodos de retorno.

$$i_{20} = \frac{1\,321}{(13 + 58,13)^{(0,633)}} = 88,83 \text{ mm/h}$$

$$i_{50} = \frac{1\,215}{(12 + 58,13)^{(0,610)}} = 90,90 \text{ mm/h}$$

$$i_{100} = \frac{1\,217}{(12 + 58,13)^{(0,609)}} = 91,44 \text{ mm/h}$$

Tabla VI. **Cálculo de la intensidad de lluvia**

Período de retorno	Intensidad de lluvia
20 años	88,83 mm/h
50 años	90,90 mm/h
100 años	91,44 mm/h

Fuente: elaboración propia.

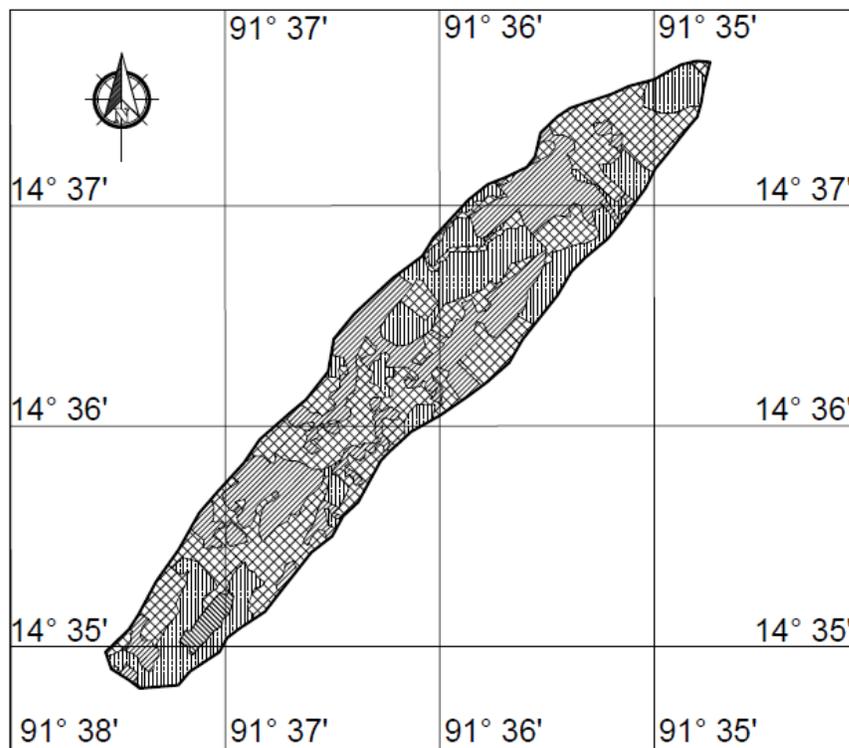
### 3.2.3. **Cálculo de coeficientes de escorrentía (C)**

No toda el agua de lluvia precipitada llega al sistema de drenaje de la cuenca, parte se pierde por varios factores, pero el que más influye es la infiltración, la cual está en función de la impermeabilidad del terreno y es por esto

que, en algunos casos también es conocido como coeficiente de impermeabilidad.

Cuando la cuenca se compone de superficies de distintas características, el valor C se obtiene como una media ponderada, calculando las áreas parciales de cada uno de los materiales que conforman la cuenca del río Muluá, como se muestra en la figura 14 y la tabla VII.

Figura 14. **Áreas del material de la cuenca para el cálculo de los coeficientes de escorrentía superficial**



Fuente: elaboración propia, empleado AutoCAD.

Tabla VII. **Áreas del material de la cuenca**

Uso de suelo	Cantidad	Simbología
Áreas pobladas y pavimento	1,85 km <sup>2</sup>	
Áreas de cultivo	0,09 km <sup>2</sup>	
Áreas de bosque	2,57 km <sup>2</sup>	
Áreas de pasto vegetación ligera	1,63 km <sup>2</sup>	

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Valores indicativos del coeficiente de escorrentía**

Uso del suelo	Pendiente del terreno	Capacidad de infiltración del suelo		
		Alto (suelos arenosos)	Medio (suelos francos)	Bajo (suelos arcillosos)
Tierra agrícola	< 5 %	0.30	0.50	0.60
	5 – 10 %	0.40	0.60	0.70
	10 – 30 %	0.50	0.70	0.80
Potreros	< 5 %	0.10	0.30	0.40
	5 – 10 %	0.15	0.35	0.55
	10 – 30 %	0.20	0.40	0.60
Bosques	< 5 %	0.10	0.30	0.40
	5 – 10 %	0.25	0.35	0.50
	10 – 30 %	0.30	0.50	0.60

Fuente: National Engineering Handbook, Sec. 4: Hydrology, USDA, 1972. Citado por INSIVUMEH, 2002.

Se debe tomar en cuenta la pendiente media de la cuenca, calculada en el capítulo anterior, la cual tiene un valor de 8,54 %, esto para seleccionar un valor de coeficiente de escorrentía de la tabla VIII.

Tabla IX. **Cálculo del coeficiente de escorrentía**

Tipo de suelo	Área (km2)	Coeficiente	$\sum C_n * A_n$
Áreas pobladas y pavimentos	1,85	0,70	1,30
Áreas de cultivo	0,09	0,60	0,05
Áreas de bosque	2,57	0,50	1,29
Área de pasto, vegetación ligera	1,63	0,35	0,57
Suma	<u>6,14</u>		<u>3,21</u>

Fuente: elaboración propia

Luego el C ponderado se calcula de la siguiente manera:

$$C = \frac{\sum C_n * A_n}{\sum A_n}$$

Donde:

C = coeficiente de escorrentía ponderado

$C_n$  = coeficiente de escorrentía para el área  $A_n$

$A_n$  = área parcial i

n = número de áreas parciales

$$C = \frac{3,21}{6,14} = 0,52$$

### 3.2.4. Caudales instantáneos máximos

Utilizando la ecuación del método racional, anteriormente descrita, para el cálculo de caudal instantáneo máximo.

$$Q = \frac{(C)(i)(A)}{3,6}$$

Donde:

Q = caudal instantáneo máximo de descarga en metros cúbicos por segundo

C = coeficiente de escorrentía

i = intensidad de la precipitación en milímetros por hora

A = área de la cuenca en kilómetros cuadrados

Tabla X. **Cálculo de los caudales instantáneos máximos**

Período de retorno	Caudales de diseño
20 años	78,78 m <sup>3</sup> /s
50 años	80,62 m <sup>3</sup> /s
100 años	81,10 m <sup>3</sup> /s

Fuente: elaboración propia

### **3.3. Análisis regional de crecidas**

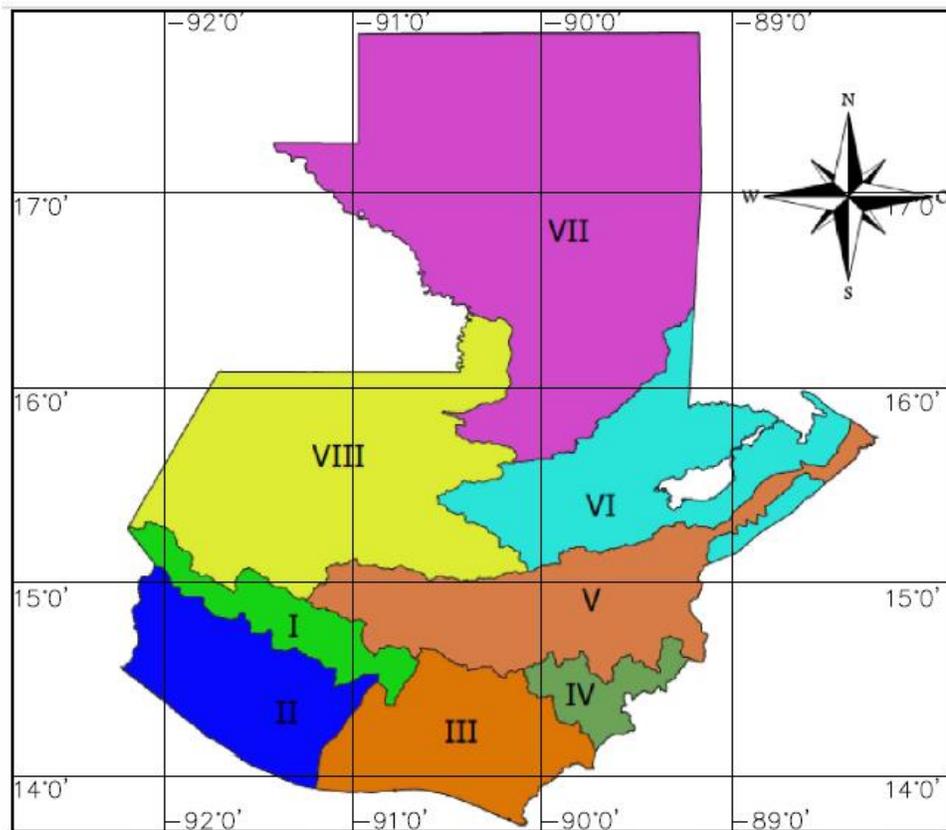
Metodología generada por el INSIVUMEH denominada análisis regional de crecidas en la república de Guatemala, la cual fue publicada en 2004, y está en función de los caudales máximos medios (QMM) y los cuartiles de caudales modulares regionales (K) para un período de retorno dado.

El análisis regional de crecidas consiste en la obtención de los registros de caudales máximos instantáneos observados por las estaciones hidrométricas del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) y del Instituto Nacional de Electrificación (INDE), cuyos registros tienen una periodicidad mayor a los 8 años.

Para la determinación de las distribuciones de frecuencias de las series de caudales modulares, las distribuciones teóricas utilizadas fueron la de curva envolvente superior y Gumbel, ya que son las más utilizadas por el INSIVUMEH.

El estudio subdivide al país en ocho regiones hidrológicas, como se puede observar en la figura 15. Esta regionalización se ha hecho en base al régimen de lluvias caracterizado por las isoyetas medias anuales, para hacerlo se ha tomado en cuenta las tendencias de los valores de QMM, en relación con el área de la cuenca.

Figura 15. **Regiones hidrológicas para la estimación de crecidas**



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis.

El procedimiento propuesto por el Departamento de Investigación y Servicios Hídricos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) es el siguiente:

- Estimar el caudal medio (QMM) mediante la ecuación  $QMM = B \cdot A^n$ , para la región de interés (ver figura 15), donde los coeficientes B y n se encuentran en la tabla XI.

Tabla XI. **Regiones hidrológicas para el análisis regional de crecidas**

CURVAS CAUDAL ÍNDICE - ÁREA DE CUENCA TRIBUTARIA				
REGIONES	N	B	n	r <sup>2</sup>
REGIÓN I: ALTIPLANO OCCIDENTAL	11,00	0,08	1,03	0,82
REGIÓN II: PACÍFICO SUROCCIDENTAL	10,00	84,00	0,24	0,18
REGIÓN III: PACÍFICO SURORIENTAL	10,00	0,26	1,04	0,80
REGIÓN IV: ALTIPLANO ORIENTAL	4,00	0,15	1,21	0,89
REGIÓN V: MOTAGUA	12,00	3,62	0,64	0,79
REGIÓN VI: POLOCHIC-CAHABÓN Y BAJO MOTAGUA	17,00	0,75	0,91	0,85
REGIÓN VII: PLANICIE DEL PETÉN	5,00	0,22	0,90	0,90
REGIÓN VIII: NOROCCIDENTAL	17,00	2,99	0,65	0,75

Fuente: Análisis regional de crecidas en la República de Guatemala.

Donde:

N = es el número de estaciones

B y n = parámetros de ajuste

r<sup>2</sup> = coeficiente de determinación

- Obtener los caudales modulares ( $K_{TR}$ ), en las tablas XII y XIII, para la curva envolvente superior y distribución de gumbel respectivamente.

Tabla XII. **Cuantiles de caudales modulares regionales k según curva envolvente superior**

Cuantiles de caudales modulares regionales, K, según curva envolvente superior								
Tr	Región							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1000	6,30	6,70	7,60	7,60	6,30	7,20	4,70	7,00
500	5,73	6,00	6,80	6,85	5,66	6,45	4,30	6,30
100	4,44	4,44	5,10	5,30	4,20	4,90	3,38	4,70
50	3,95	3,90	4,36	4,60	3,66	4,26	3,00	4,10
30	3,58	3,53	3,87	4,10	3,25	3,78	2,72	3,64
25	3,44	3,40	3,72	3,90	3,13	3,60	2,62	3,48
20	3,28	3,22	3,47	3,70	2,97	3,40	2,50	3,28
10	2,80	2,70	2,85	3,05	2,48	2,82	2,10	2,75
5	2,30	2,20	2,24	2,40	2,00	2,28	1,75	2,22
2	1,60	1,49	1,45	1,50	1,38	1,60	1,28	1,50

Fuente: Análisis regional de crecidas en la República de Guatemala.

Tabla XIII. **Cuantiles de caudales modulares regionales k distribución de Gumbel**

Cuantiles de caudales modulares regionales, K, distribución de Gumbel								
Tr	Región							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1000	5,78	5,37	6,45	7,35	4,60	4,16	3,91	4,76
500	5,26	4,90	5,86	6,66	4,21	3,82	3,60	4,36
100	4,05	3,79	4,48	5,06	3,30	3,02	2,86	3,40
50	3,53	3,32	3,89	4,37	2,91	2,67	2,54	2,99
30	3,14	2,96	3,44	3,86	2,62	2,42	2,30	2,69
25	3,01	2,84	3,29	3,67	2,51	2,32	2,22	2,58
20	2,84	2,68	3,09	3,44	2,38	2,21	2,12	2,44

Continuación tabla XIII.

10	2,30	2,19	2,48	2,73	1,98	1,85	1,79	2,02
5	1,74	1,68	1,84	1,99	1,55	1,48	1,44	1,57
2	0,89	0,90	0,87	0,86	0,91	0,92	0,93	0,91

Fuente: Análisis regional de crecidas en la República de Guatemala.

- Calcular el caudal máximo asociado a diferentes períodos de retorno con la ecuación  $Q_{TR} = QMM * K_{TR}$ .

Donde:

$Q_{TR}$  = es el caudal para el período de retorno  $Tr$

$QMM$  = es la crecida índice

$K_{TR}$  = es la crecida modular (o estandarizada)

### 3.3.1. Determinación de caudales

Utilizando la metodología detallada anteriormente, se determinan los caudales máximos de la cuenca del río Muluá. El área de la cuenca es de 6,14 km<sup>2</sup>; toda la cuenca se encuentra en la Región II, denominada pacifico sur occidental. La estimación de la crecida asociada a un período de retorno de 20, 50 y 100 años, puede hacerse como sigue:

- Estimar el  $QMM$  mediante la ecuación descrita anteriormente, utilizando los coeficientes  $B$  y  $n$  de la tabla XI, para la Región II.

Tabla XIV. **Caudal máximo medio para la cuenca del río Muluá**

Caudal máximo medio para la cuenca del río Muluá, ubicada en la Región II	
Datos:	
B	84,00
n	0,24
Área de la cuenca	6,14 km <sup>2</sup>
QMM	129,85 m <sup>3</sup> /s

Fuente: elaboración propia.

- Obtener los caudales modulares para un período de retorno de 20, 50 y 100 años, de las tablas XII y XIII, para las distribuciones de frecuencia Gumbel y la envolvente, para la Región II.

Tabla XV. **Caudales modulares, K, según curva envolvente superior**

Caudales modulares, K, según curva envolvente superior	
Tr	Región
	II
100	4,44
50	3,90
20	3,22

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Caudales modulares, K, distribución de Gumbel**

Caudales modulares, K, distribución de Gumbel	
Tr	Región
	II
100	3,79
50	3,32
20	2,68

Fuente: elaboración propia.

- Calcular el caudal máximo para los períodos de retorno de 100, 50 y 20 años, con la ecuación  $Q_{TR} = QMM * K_{TR}$ .

Caudales máximos en función de caudales modulares regionales, k, según curva envolvente superior.

$$Q_{100} = 129,85 * 4,44 = 576,53 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{50} = 129,85 * 3,90 = 506,41 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{20} = 129,85 * 3,22 = 418, 11 \text{ m}^3/\text{s}$$

Caudales máximos en función de caudales modulares regionales, k, distribución de Gumbel.

$$Q_{100} = 129,85 * 3,79 = 492,13 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{50} = 129,85 * 3,32 = 431,10 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{20} = 129,85 * 2,68 = 348,00 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 3.3.2. Caudales instantáneos máximos en la cuenca del río Muluá

Para la determinación de un caudal de diseño de las obras de protección se comparan los dos caudales resultantes, para un período de retorno determinado, en función de los caudales modulares regionales con dos tipos diferentes de distribuciones de frecuencia, en este caso Gumbel y envolvente superior.

Tabla XVII. **Caudales máximos, asociados a períodos de retorno (tr) en función de caudales modulares regionales k con distribuciones indicadas**

Caudales máximos, asociados a períodos de retorno (Tr) en función de caudales modulares regionales k con distribuciones indicadas		
Tr	QTR ENV (m <sup>3</sup> /s)	QTR Gumbel (m <sup>3</sup> /s)
100	576,53	492,13
50	506,41	431,10
20	418,11	348,00

Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Comparación de resultados

A continuación, se muestran los resultados del caudal con los métodos empleados anteriormente:

Tabla XVIII. **Comparativa de caudales instantáneos máximos**

CAUDALES DE DISEÑO (m <sup>3</sup> /s)			
Tr	QTR Envolvente	QTR Gumbel	QDIS Racional
20 años	418,11	348,00	78,78
50 años	506,41	431,10	80,62
100 años	576,53	492,13	81,10

Fuente: elaboración propia.

Como se aprecia en la tabla XXVIII la diferencia entre los resultados es de gran cantidad, esto se podría deber al valor del coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de la tabla XI, el cual resulta ser muy bajo (0,18), en comparación con las otras regiones. Esto se debe, en parte, a que las series reportadas tienen valores de caudales que manifiestan cierta incertidumbre en su deducción. La falta de confiabilidad en varias de las series se debe a que los caudales reportados se han derivado de extrapolación de las curvas de descarga de las estaciones respectivas.

Estas curvas se basan en mediciones directas de caudales medios a bajos, durante eventos de crecidas son muy pocas las mediciones efectuadas. Esto se debe, a su vez, al costo que representa realizar mediciones directas durante eventos extraordinarios y a que muchos de estos eventos ocurren repentinamente, en horas y condiciones difíciles.

Prácticamente en todas las regiones se tiene una buena relación entre la crecida índice y el área de la cuenca, excepto para la región II, debido a la situación descrita anteriormente.

Por ello es que los valores de caudal por utilizar en la simulación serán los calculados por el método racional, 78,78 m<sup>3</sup>/s, 80,62 m<sup>3</sup>/s y 81,10 m<sup>3</sup>/s, con períodos de retorno de 20, 50 y 100 años, respectivamente. Este se considera el resultado más cercano y certero a la realidad.

## 4. APLICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN HEC-RAS EN EL TRAMO DEL RÍO MULUÁ

### 4.1. Introducción al programa HEC-RAS

El programa HEC-RAS fue desarrollado en el Centro de Ingeniería Hidrológica (*Hydrologic Engineering Center*) por el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos (*US Army Corps of Engineers*). HEC-RAS es un modelo hidráulico diseñado para ayudar en el análisis de canales de flujo y determinación de llanura de inundación.

El procedimiento principal utilizado por el programa para calcular perfiles de agua superficial, parte del supuesto de que el flujo varía gradualmente y este es llamado el método de paso directo. El procedimiento del cálculo se basa en una solución iterativa de la ecuación de energía.

Los datos ingresados para el procedimiento de análisis y la generación de resultados por el software HEC-RAS son:

- La superficie digital del área de estudio, en este caso, la superficie donde está ubicado el río Muluá.
- Los caudales máximos instantáneos calculados a partir de las curvas de intensidad, duración y frecuencia de la estación meteorológica de Retalhuleu (ver tabla X).
- Los coeficientes de rugosidad de Manning (ver tabla XIX).

Esta información integrada proporciona en forma gráfica, las cotas de crecida y las áreas de inundación.

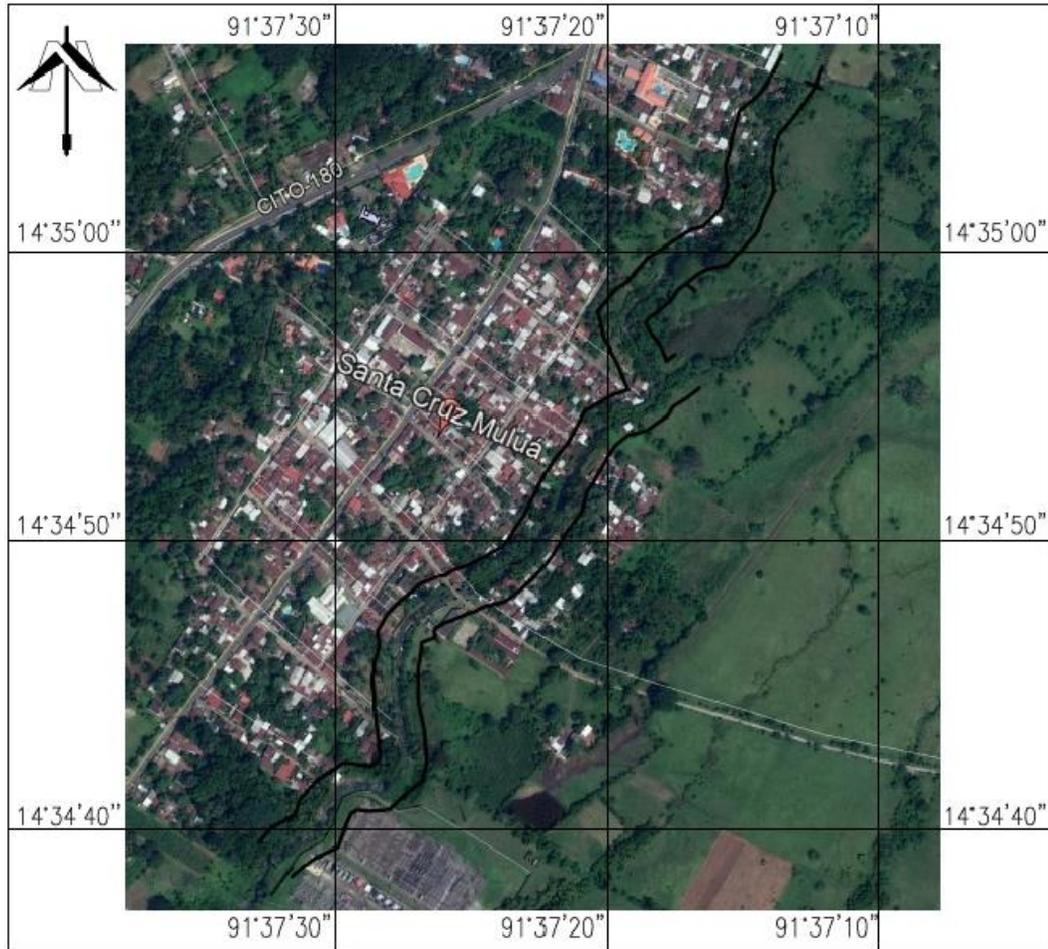
## **4.2. Procesamiento y análisis de la información**

Al recolectar toda la información necesaria, lo que se requiere es determinar el comportamiento del río Muluá, para ello se utiliza el software HEC-RAS, con caudales máximos para varios períodos de retorno, con el objetivo de reducir el riesgo y vulnerabilidad de las inundaciones que se provocan en el área, a través del diseño de obras de protección.

### **4.2.1. Levantamiento topográfico**

Parte de la urbanización que existe en Santa Cruz Muluá está ubicada en los bordes del río Muluá, en el departamento de Retalhuleu. El área se ha visto afectada por inundaciones, en especial el centro de salud que se ubica en el lugar. Para el cálculo de cotas de crecidas máximas se debe realizar un levantamiento topográfico del área de interés, que va desde la estación 0+000 (entrada a Santa Cruz Muluá) a la estación 1+188 (Hotel Costa Bella), para un total de 1 kilómetro con 188 metros.

Figura 16. **Proyección del levantamiento topográfico realizado en el río Muluá**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

El levantamiento se realizó haciendo secciones trasversales del río a cada 20 metros, con un ancho promedio de 50 metros, seccionando el río de forma perpendicular al centro de este, proporcionando información de taludes, como coronas y pies, fondo del río, viviendas y todo aquello que fuera de interés para el estudio.

Figura 17. Levantamiento topográfico realizado en el río Muluá



Fuente: elaboración propia, fotografía tomada el día del levantamiento.

En el lugar se dejaron seis bancos de marca, para un posible replanteo en un futuro, cuya ubicación y coordenadas se especifican en el plano No. 1.

Figura 18. **Banco de marca dejado en el área de estudio**



Fuente: elaboración propia, fotografía tomada el día del levantamiento.

La geometría del cauce del río Muluá, planta, perfil y secciones transversales se presentan en los planos No. 1, 2, 3 y 4.

#### **4.2.2. Cálculo del caudal instantáneo máximo de diseño utilizado para la simulación hidráulica en HEC-RAS**

Los caudales utilizados en la simulación hidráulica en el programa HEC-RAS fueron calculados utilizando el método racional. Los caudales calculados por el método del INSIVUMEH, denominado análisis regional de crecidas en la república de Guatemala, presentan cierta incertidumbre en su deducción, ya que

los caudales reportados se han derivado de extrapolación de las curvas de descarga de las estaciones respectivas.

#### **4.2.3. Selección de los coeficientes de rugosidad de Manning**

En la selección del coeficiente de rugosidad de Manning, depende de lo observado en campo, de las condiciones en las que se presenta el comportamiento del flujo en estudio, como son condición y tipo de suelo presente en el lecho del río, así como la presencia de vegetación en las riberas.

**Figura 19. Tipo de suelo presente en el río Muluá**



Fuente: elaboración propia, fotografía tomada el día del levantamiento.

Tabla XIX. Valores de coeficiente de Manning

DESCRIPCION DE LA CORRIENTE	MINIMO	NORMAL	MAXIMO
A Cauces naturales			
A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida < 30 m)			
A.1.1 Cursos en planicies			
- Limpios, rectos, sin fallas ni pozos	0.025	0.030	0.033
- Rectos con algunas piedras y pastos	0.030	0.035	0.040
- Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos	0.033	0.040	0.045
- Meandros con algunas piedras y pastos	0.035	0.045	0.050
- Meandros con muchas piedras	0.045	0.050	0.060
- Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
- Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos y matorral	0.075	0.100	0.150
A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetacion en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en laderas que se sumergen en niveles de crecida			
- Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
- Cauce de cantos rodados, con grandes rocas	0.040	0.050	0.070
A.2 Cursos en planicies inundadas			
A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos			
- Pasto corto	0.025	0.030	0.035
- Pasto alto	0.030	0.035	0.050
A.2.2 Zonas cultivadas			
- Sin cultivo	0.020	0.030	0.030
- Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0.025	0.035	0.045
- Cultivos sembrados en volco en fase de madurez fisiológica	0.030	0.040	0.050
A.2.3 Zonas arbustivas			
- Escasos arbustos y pasto abundante	0.035	0.050	0.070
- Pequeños árboles y arbustos sin follaje (parada invernal)	0.035	0.050	0.060
- Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)	0.040	0.060	0.080
- Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0.045	0.070	0.110
- Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0.070	0.100	0.160
A.2.4 Zonas arbóreas			
- Sauces densos, temporada invernal	0.110	0.150	0.200
- Terreno claro con ramas sin brotes	0.030	0.040	0.050
- Terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes	0.050	0.060	0.080
- Zona de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y niveles de inundación por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
- Zona de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y niveles de inundación que alcanza a las ramas	0.100	0.120	0.160
A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida > 30 m)			
En este caso, los valores del coeficiente n son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menor			
- Sección regular sin rocas ni arbustos	0.025		0.060
- Sección irregular y rugosa	0.035		0.100

Fuente: Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS. *River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. 2016.

Como se puede apreciar en la figura 19 se ha considerado que el cauce presenta las condiciones de meandros con muchas piedras en el lecho del río y meandros con algunas piedras y pastos en los bordes, por tanto, conlleva a la utilización de varios coeficientes de rugosidad, tanto para el lecho del río como para las riberas.

Tabla XX. **Valores estimados de los coeficientes de Manning.**

Ribera de río derecha	Lecho de río	Ribera de río izquierda
0,045	0,050	0,045

Fuente: elaboración propia.

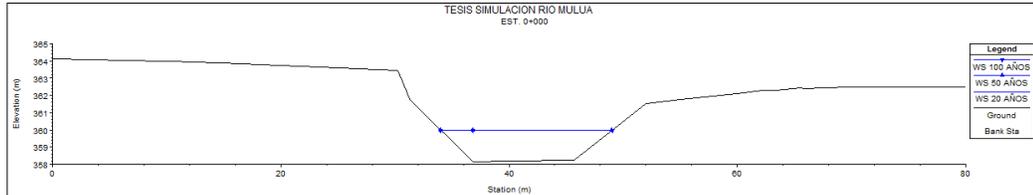
#### **4.3. Datos hidráulicos del río Muluá**

En la sección de anexos se presentan los datos de la hidráulica fluvial a cada 20 metros, generados por el software HEC-RAS, en base a los caudales de diseño calculados. Los datos se encuentran tabulados para cada período de retorno, los diferentes caudales, cotas de crecidas, velocidad del río y áreas inundadas.

#### **4.4. Simulación de inundación en el tramo de estudio del río Muluá**

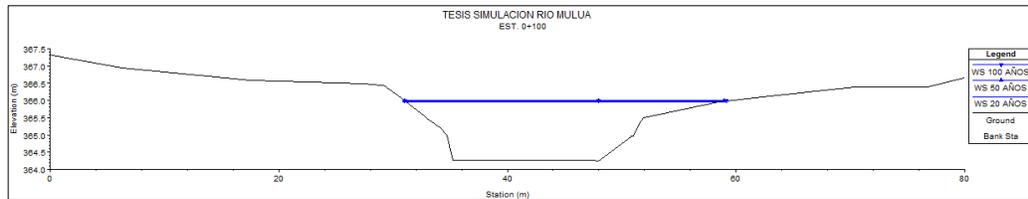
En las figuras de la 20 a la 32 se presenta la simulación realizada con el programa HEC-RAS, en donde se observan los niveles de agua para las crecidas máximas en base a los caudales de diseño calculados, estas secciones son presentadas a cada 100 metros.

Figura 20. **Simulación hidráulica en la estación 0+000**



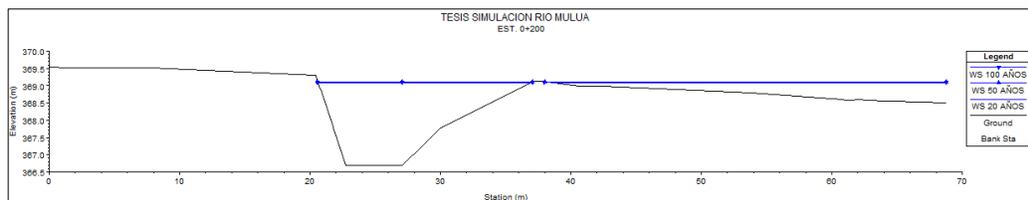
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 21. **Simulación hidráulica en la estación 0+100**



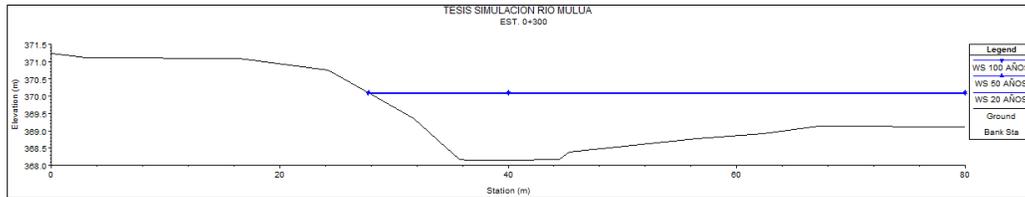
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 22. **Simulación hidráulica en la estación 0+200**



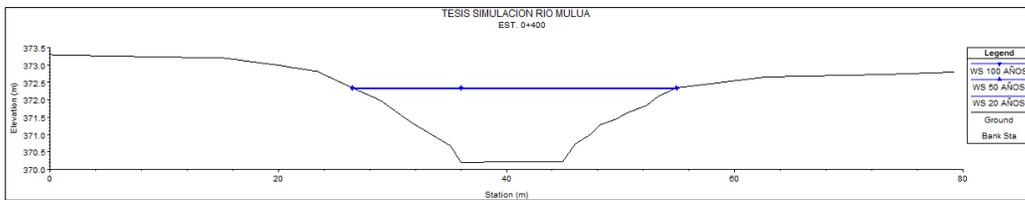
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 23. **Simulación hidráulica en la estación 0+300**



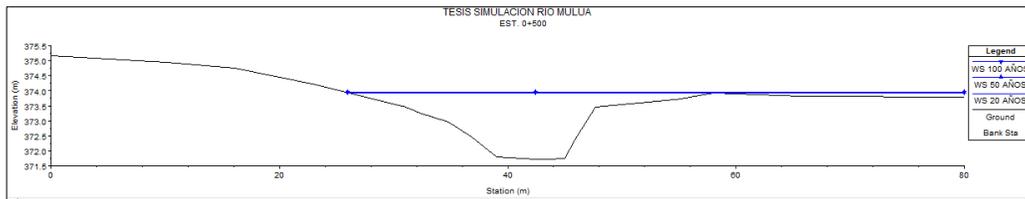
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 24. **Simulación hidráulica en la estación 0+400**



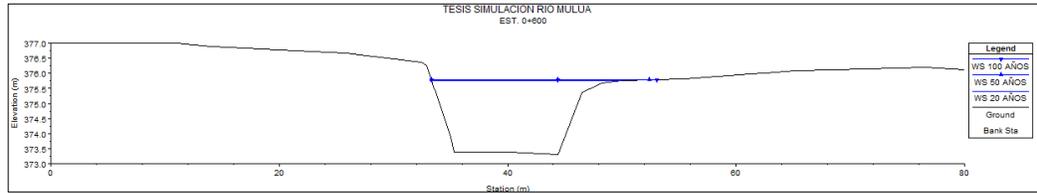
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 25. **Simulación hidráulica en la estación 0+500**



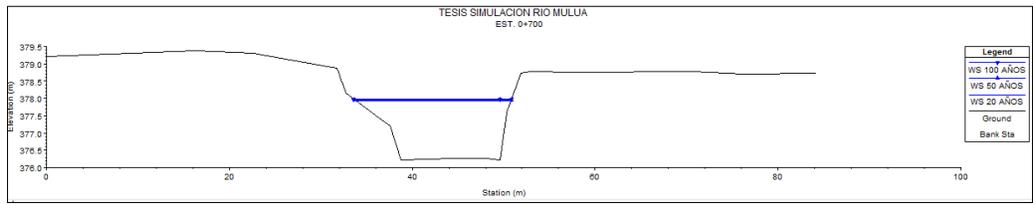
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 26. **Simulación hidráulica en la estación 0+600**



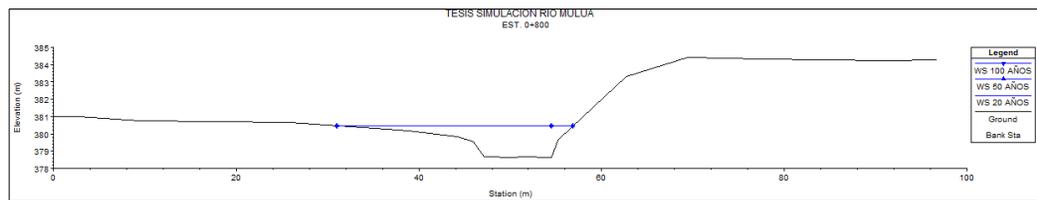
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 27. **Simulación hidráulica en la estación 0+700**



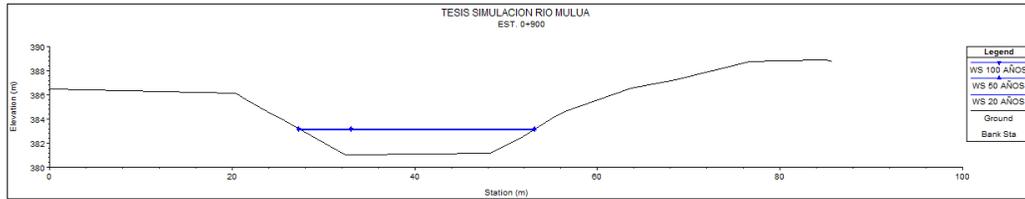
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 28. **Simulación hidráulica en la estación 0+800**



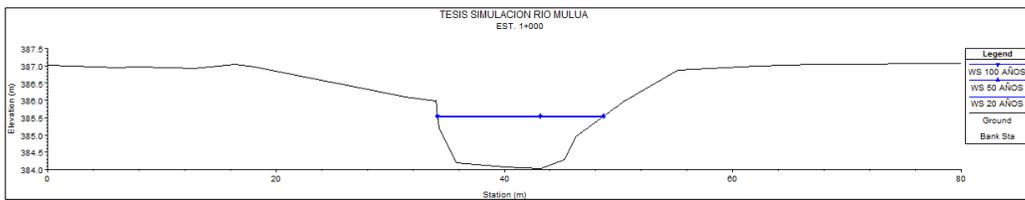
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 29. **Simulación hidráulica en la estación 0+900**



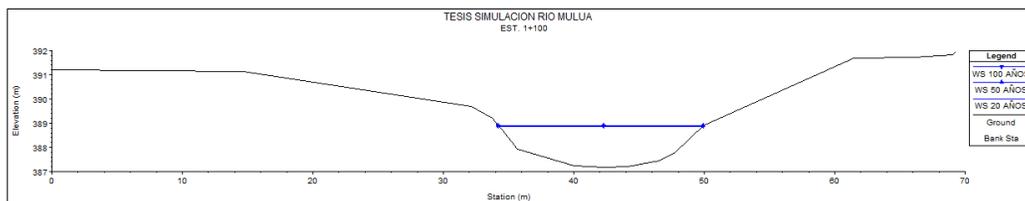
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 30. **Simulación hidráulica en la estación 1+000**



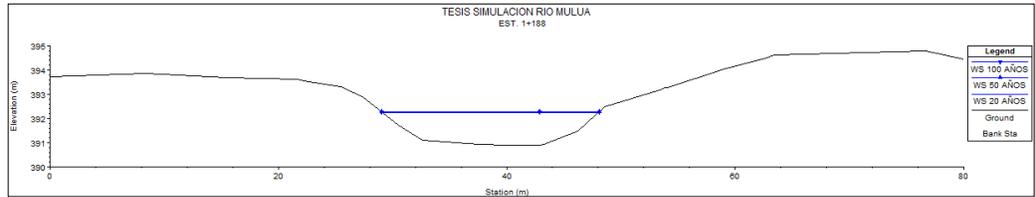
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 31. **Simulación hidráulica en la estación 1+100**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 32. **Simulación hidráulica en la estación 1+188**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

#### 4.4.1. **Resultado de la simulación de inundación en el tramo de estudio del río Muluá**

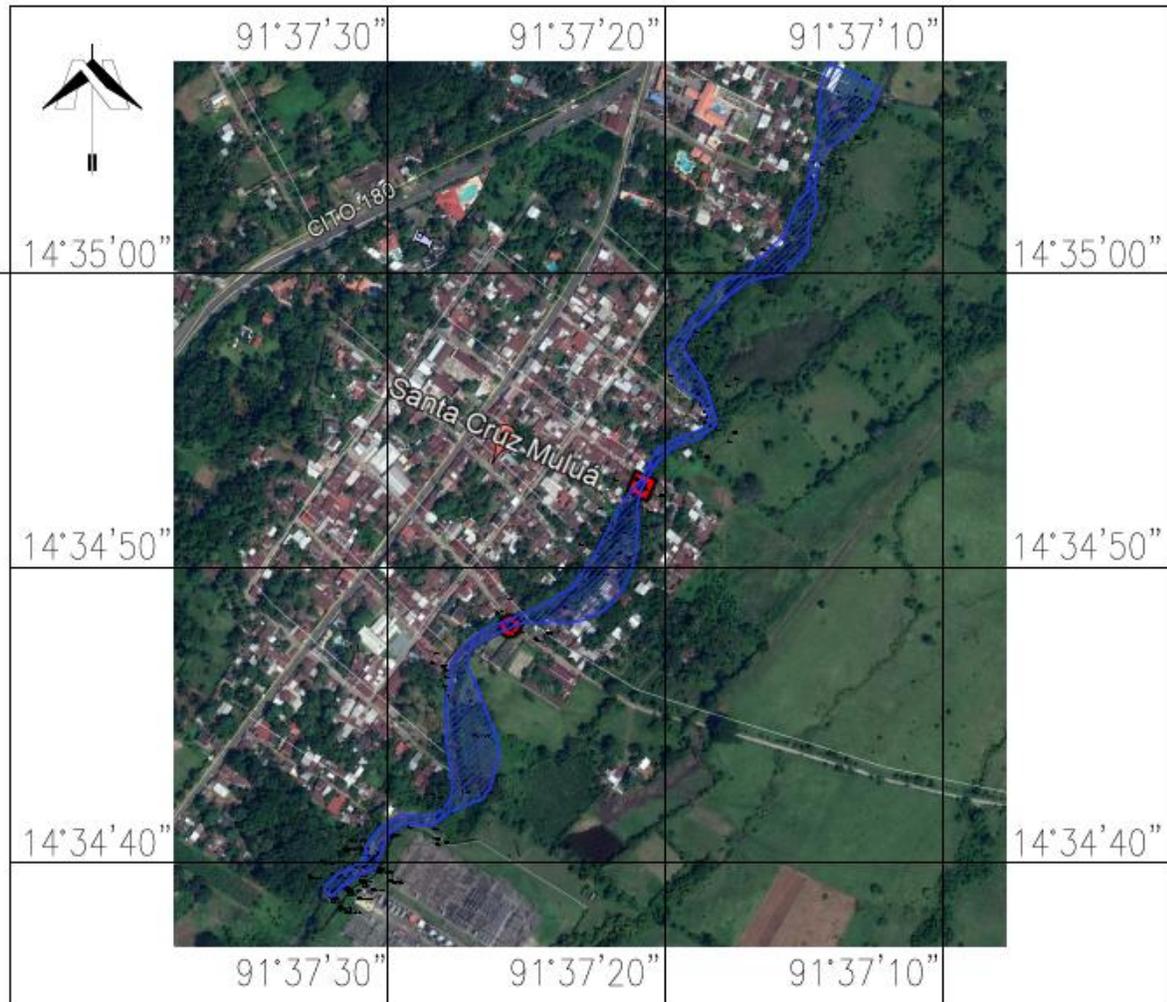
En base a la simulación realizada, se determinan las áreas de desbordamiento del río, las cuales se detallan en la tabla XXI, de igual manera se pueden observar en la proyección de la figura 33 y en el plano No. 5.

Tabla XXI. **Áreas de desbordamiento del río Muluá**

EST.			LARGO (m)	TRAMO
0+180	a	0+320	140,00	TD1
0+440	a	0+620	180,00	TD2
0+940	a	1+000	60,00	TD3
1+120	a	1+180	60,00	TD4
0+760	a	0+820	60,00	TD5
0+940	a	1+040	100,00	TD6
1+120	a	1+180	60,00	TD7

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Proyección de las áreas de desbordamiento del río Muluá**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

A cada una de las áreas de desbordamiento, se le ha asignado un nombre, como se muestra en la tabla XXI, donde TD significa, tramo de desbordamiento, para identificar mejor el área.

El tramo TD1 tiene una longitud de 140 m, ubicada en el margen izquierdo del río Muluá, a 470 metros de la finca El Brillante a un costado de la 2ª avenida entre 6ª y 7ª calle de la zona 2 de Santa Cruz Muluá.

El tramo TD2 tiene una longitud de 180 m, ubicado en el margen izquierdo del río Muluá, a un costado de la 2ª avenida entre 3ª y 5ª calle de la zona 2 de Santa Cruz Muluá.

El tramo TD3 tiene una longitud de 60 m, ubicado en el margen izquierdo del río Muluá, a 120 m de la 1ª calle de la zona 2 de Santa Cruz Muluá, localizado, en la finca Maryland.

El tramo TD4 tiene una longitud de 60 m, ubicado en el margen izquierdo del río Muluá, a 300 m de la 1ª calle de la zona 2 de Santa Cruz Muluá, localizado, en la finca Maryland.

El tramo TD5 tiene una longitud de 60 m, ubicado en el margen derecho del río Muluá, a un costado de la 2ª avenida entre 1ª y 2ª calle de la zona 2 de Santa Cruz Muluá.

El tramo TD6 tiene una longitud de 100 m, ubicado en el margen derecho del río Muluá, a 120 m de la 1ª calle de la zona 2 de Santa Cruz Muluá, localizado, en la finca Maryland.

El tramo TD7 tiene una longitud de 60 m, ubicado en el margen derecho del río Muluá, a 300 m de la 1ª calle de la zona 2 de Santa Cruz Muluá, localizado, en la finca Maryland.



## **5. PROPUESTA DE LA OBRA DE PROTECCIÓN**

### **5.1. Descripción de las obras de protección**

Las obras de protección del cauce de un río, consisten en estructuras, ya sean transversales al cauce como las represas, o longitudinales, ubicadas en las márgenes del río, el fin de estas obras es la reducción del riesgo de inundación, erosión o socavación de la infraestructura. Estas pueden ser revestimientos naturales o artificiales en los taludes del cauce, como bordas de roca, bordas revestidas con morteros, espigones, diques de concreto armado o gaviones.

#### **5.1.1. Bordas**

Estructuras que se construyen a lo largo de los ríos, con el objetivo de confinar el escurrimiento que sobresale de los límites durante las crecidas, protegiendo la llanura de inundación contra desbordamientos, su ubicación se determina a partir de las llanuras de inundación.

#### **5.1.2. Bordas revestidas de roca**

Se conocen también como enrocados o “rip rap”, y se pueden describir como una borda con una capa de roca, depositada para evitar su erosión. La ubicación de esta se determina a partir de las llanuras de inundación, teniendo menor importancia las condiciones de terreno para la cimentación. Sin embargo, en algunos casos es importante que se coloque al pie de la borda un cimiento conformado de la misma roca, para evitar asentamientos.

### **5.1.3. Espigones**

Son estructuras colocadas perpendicularmente al sentido de la corriente, con un extremo unido al margen del río. El fin de estas estructuras consiste en alejar de la orilla las líneas de corriente con alta velocidad, y evitar así la erosión del material de las riberas.

### **5.1.4. Muros longitudinales**

Consiste en una barrera de forma vertical, colocada en sustitución de una borda, en consecuencia, ya que el volumen de este resulta ser muy grande, no se tiene el espacio suficiente para construir una borda. Son frecuentes en ríos que cruzan zonas urbanas, tratando de ocupar el menor espacio posible. El muro debe ser protegido contra la erosión, con enrocado en la cara expuesta a la corriente del río.

## **5.2. Propuesta**

El área de estudio se ve afectada en ocasiones por las grandes crecidas del río Muluá, debido a la gran cantidad de lluvia anual que cae en el área, y que provoca daño a viviendas y habitantes.

Se proponen bordas para así contener las inundaciones, dadas las condiciones del lugar, así como por economía, además de utilizar los materiales del lugar, buscando los sitios de donde posiblemente se podría extraer la piedra.

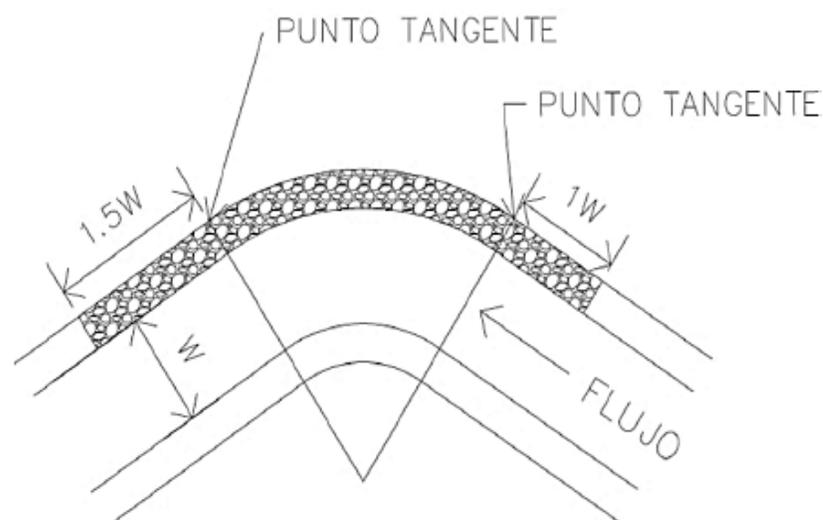
### 5.3. Propiedades de las obras hidráulicas

Para realizar el diseño de las bordas se deben tener en cuenta varios aspectos para que sean funcionales y duraderas, los cuales se detallan a continuación.

#### 5.3.1. Extensión de la protección

Uno de los aspectos de suma importancia es la longitud de protección requerida, dependiendo mucho de las condiciones y características del lugar. Uno de los criterios para establecer los límites longitudinales de protección en una curva es el que se ilustra en la figura 34, el cual muestra las distancias mínimas recomendadas para una protección, tomando en consideración el ancho del río. Todas las líneas de referencia pasan a través de las tangentes a la curva en la entrada o salida de una curvatura.

Figura 34. Extensión longitudinal de la protección de un cauce



Fuente: Hydraulic Engineering. *Design of rip rap revetment*, circular No. 11. 1989.

Este criterio se basa en el análisis de las condiciones de flujo en curvas de los canales simétricos en condiciones ideales de laboratorio. Un diseñador puede encontrar el criterio anterior como difícil de aplicar en longitudes ligeramente curvas o en canales con longitudes irregulares. Por lo tanto, el criterio anterior solo debe ser utilizado como un punto de vista.

### **5.3.2. Altura de la borda**

La altura se determinó por el alto de la lámina de agua de la crecida, la que se estimó por medio de la simulación hidráulica del capítulo anterior, más una altura de borda libre. La borda libre es para asegurar la protección por la acción de las olas que se puedan llegar a generar a causa del viento, irregularidades del flujo debido a transiciones o intersecciones de flujo.

Para la altura de la borda libre se pueden considerar valores mínimos de 0,30 m a 0,60 en tramos libres de restricciones y de 0,61 m a 0,90 m, para tramos con restricciones (transiciones o intersecciones de flujo).

### **5.3.3. Especificaciones técnicas de la roca**

Como en toda obra, los materiales que se utilizarán para la construcción deben cumplir ciertos requisitos de calidad, la fuente de la roca debe ser seleccionada anticipadamente al momento que la roca sea requerida en la obra.

Las obras de protección que se diseñarán a continuación son una aproximación de las obras finales, las cuales para su diseño dependerán de un estudio de suelo y análisis estructural. Por ello el diámetro de la roca que se utilizará en la construcción de estas obras será de 30 cm, ya que es el diámetro más comercial.

Algunas especificaciones técnicas que deberían cumplir son:

#### **5.3.3.1.      Peso específico de la roca**

Valor adimensional entre el peso de la roca y el peso de un volumen equivalente de agua a 4°C (condiciones de máxima densidad de agua). El peso específico mínimo de la roca debe ser 2,48 (adimensional).

#### **5.3.3.2.      Ensayo de abrasión**

El objeto de dicho ensayo es medir el desgaste producido por una combinación de impacto y rozamiento al material, la resistencia a la abrasión se usa generalmente como un índice de calidad de los agregados, ya que proporciona cierta indicación de la capacidad y calidad.

Este ensayo se realiza con la máquina de Los Ángeles (AASHTO T96), como resultado de dicho ensayo el porcentaje de pérdida de la roca no debe ser mayor de 40 % después de 500 revoluciones.

#### **5.3.3.3.      Ensayo de resistencia de sulfatos**

En lugares donde la roca estará expuesta a aguas con alto contenido de sulfato, debe usarse el ensayo de resistencia a sulfatos (AASHTO O 104 para roca expuesta, usando sulfato de sodio).

#### **5.4. Diseño de bordas**

Teniendo en cuenta las propiedades anteriormente descritas, se procede al diseño de la borda para el tramo TD1 (ver tabla XXI), el cual va de la estación 0+180 a la estación 0+320.

El tramo TD1 tiene una longitud de 140 m y según las recomendaciones de la extensión longitudinal, en el tramo se tiene una longitud de ancho promedio aguas abajo de 12,30 m y aguas arriba de 17,35 m.

$$\text{Extensión aguas abajo} = 12,30 * 1,5 = 18,45 \text{ m}$$

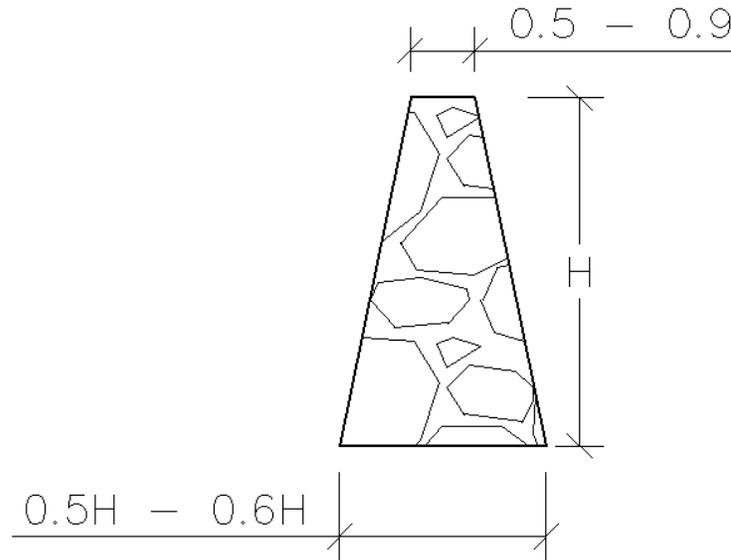
$$\text{Extensión aguas arriba} = 17,35 * 1 = 17,35 \text{ m}$$

$$\text{Extensión del tramo TD1} = 18,45 + 17,35 + 140 = 175,8 \text{ m}$$

##### **5.4.1. Predimensionamiento estructural**

En el predimensionamiento de los muros de contención se aplica el siguiente criterio: la base debe ser de 0,5 a 0,6 de la altura total del muro, esta dimensión debe ser comprobada posteriormente.

Figura 35. **Predimensionamiento de bordas**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Para predimensionar la borda primero se calcula la altura, tomando en consideración todas las secciones transversales del tramo TD1 (ver anexo 10 al 17), se determina la altura de la lámina de agua de la crecida, para el caudal con período de retorno de 100 años, más una altura de borda libre de 0,60 m.

Tabla XXII. **Altura de la lámina de agua de la estación 0+180 a la estación 0+320, para el caudal con período de retorno de 100 años**

Estación	Cota canal mínima (m)	Crecida máxima (m)	Altura de la crecida (m)
0+320	368,53	370,08	1,55
0+300	368,15	370,1	1,95
0+280	368,12	369,88	1,76

Continuación tabla XXII.

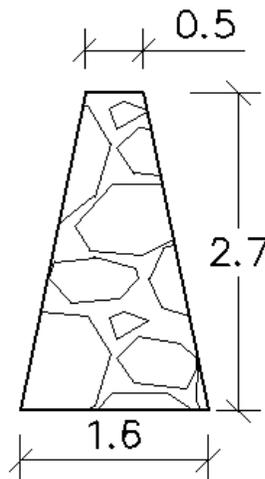
0+260	367,61	369,82	2,21
0+240	367,3	369,75	2,45
0+220	366,85	369,3	2,45
0+200	366,69	369,12	2,43
0+180	366,15	367,87	1,72

Fuente: elaboración propia.

Haciendo un promedio de los valores de altura de la crecida de la tabla XXII, se obtiene 2,07 m, calculando así la altura de la borda.

$$\text{Altura de la borda} = 2,07 + 0,6 = 2,67 \text{ m}$$

Figura 36. **Medidas preliminares de la borda del tramo TD1**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

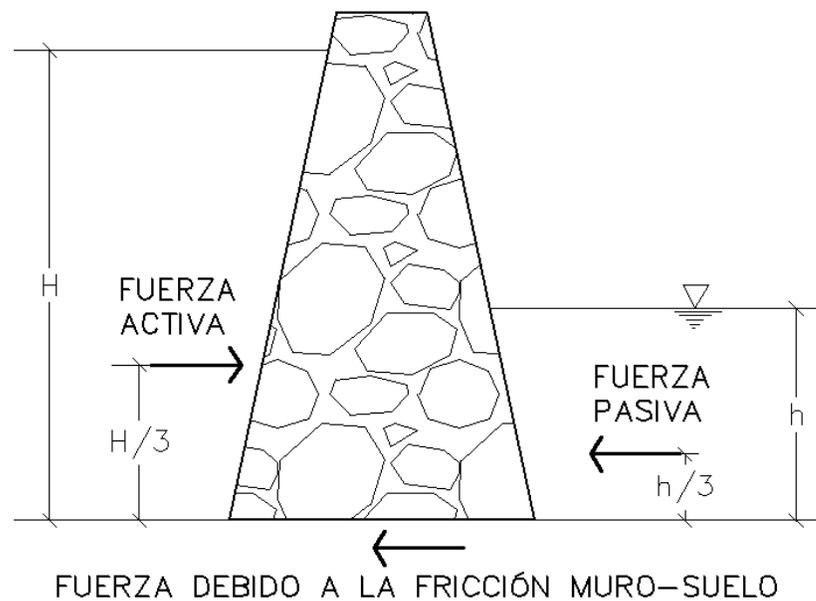
## 5.4.2. Cargas aplicadas a las bordas

Para visualizar de una mejor manera todas las cargas que son aplicadas en una borda se muestran las siguientes figuras, tanto para cargas horizontales como verticales.

### 5.4.2.1. Cargas horizontales

Las cargas horizontales en una borda son provocadas por el material de relleno, talud a retener o sobrecargas en la superficie horizontal del mismo, como se muestra en la figura 37.

Figura 37. Fuerzas horizontales que actúan en una borda

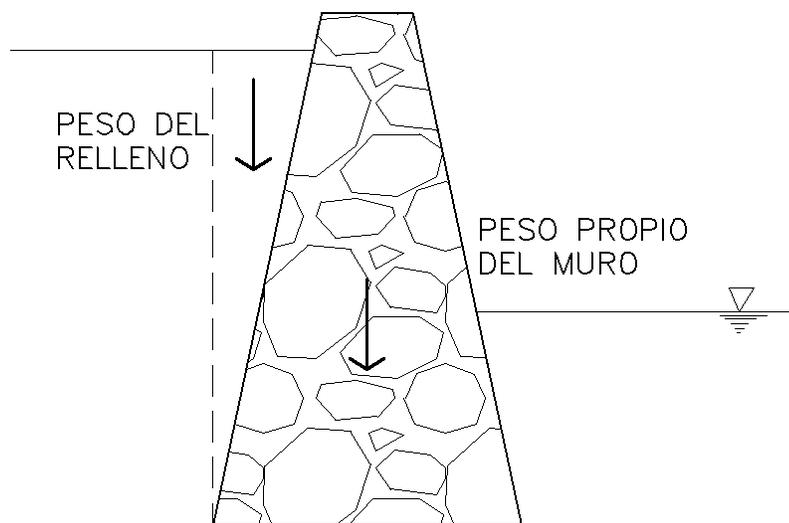


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

### 5.4.2.2. Cargas verticales

Las cargas verticales son el peso de los materiales, tanto de la borda como del material de relleno o sobrecarga, como se muestra en la figura 38.

Figura 38. Fuerzas verticales que actúan en una borda



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

### 5.4.3. Comprobación por volteo

El volteo en una borda es provocado la mayoría de las veces por la acción del empuje activo. Por ello se recomienda un factor de seguridad para evitar dicho fenómeno, siendo este una relación entre los momentos resistentes y momentos actuantes, dicho factor debe ser como mínimo igual o mayor a 1,5.

$$FS = \frac{\text{momentos resistentes}}{\text{momentos actuantes}} \geq 1,5$$

A continuación, se presenta el procedimiento para la comprobación por volteo, para ello se requieren ciertos datos de diseño, los cuales se presentan a continuación:

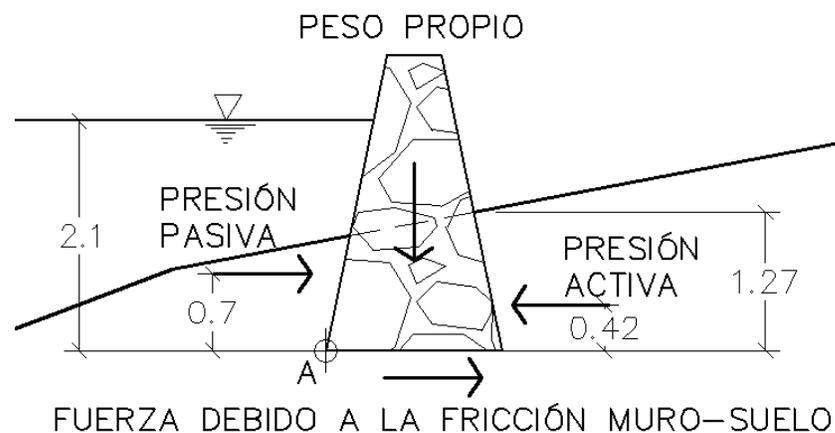
Tabla XXIII. **Datos de diseño para las bordas**

Peso específico del suelo, asumido ( $\gamma_s$ )	1,60 ton/m <sup>3</sup>
Peso específico de la piedra de relleno, asumido ( $\gamma_c$ )	2,20 ton/m <sup>3</sup>
Peso específico del agua, asumido ( $\gamma_w$ )	1,00 ton/m <sup>3</sup>
Ángulo de fricción interna del suelo, asumido ( $\phi$ )	30°
Valor soporte del suelo, asumido ( $V_s$ )	22,00 ton/m <sup>2</sup>
Sobrecarga considerada ( $q$ )	0,70 ton/m <sup>2</sup>
Coefficiente de fricción entre el suelo y el muro	0,40

Fuente: elaboración propia.

En la figura 39 se puede apreciar el diagrama de todas las fuerzas que se aplican en la borda del tramo TD1:

Figura 39. **Diagrama de fuerzas que actúan en la borda del tramo TD1**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

- Se procede al cálculo de los coeficientes de empuje activo ( $K_a$ ) y pasivo ( $K_p$ ).

$$K_a = \frac{1 - \operatorname{sen} \varphi}{1 + \operatorname{sen} \varphi}$$

$$K_p = \frac{1 + \operatorname{sen} \varphi}{1 - \operatorname{sen} \varphi}$$

Donde:

$K_a$  = coeficiente de empuje activo

$K_p$  = coeficiente de empuje pasivo

$\varphi$  = ángulo de fricción interna del suelo

$$K_a = \frac{1 - \operatorname{sen} 30^\circ}{1 + \operatorname{sen} 30^\circ} = 0,33$$

$$K_p = \frac{1 + \operatorname{sen} 30^\circ}{1 - \operatorname{sen} 30^\circ} = 3,00$$

- Se prosigue al cálculo de las cargas horizontales apreciadas en la figura 39.

$$P_a = \frac{1}{2} * K_a * \gamma_s * H^2$$

Donde:

$P_a$  = carga activa en ton/m

$K_a$  = coeficiente de empuje activo

$\gamma_s$  = peso específico del suelo en ton/m<sup>3</sup>

H = altura del suelo en m

$$P_a = \frac{1}{2} * 0,33 * 1,60 * 1,27^2 = 0,43 \text{ ton/m}$$

$$P_p = \frac{1}{2} * K_p * \gamma_w * h^2$$

Donde:

$P_p$  = carga pasiva en ton/m

$K_p$  = coeficiente de empuje pasivo

$\gamma_w$  = peso específico del agua en ton/m<sup>3</sup>

h = altura del agua en m

$$P_p = \frac{1}{2} * 3 * 1,00 * 2,10^2 = 6,62 \text{ ton/m}$$

- Se prosigue al cálculo de los momentos al pie del muro respecto del punto A.

$$M_{Pa} = P_a * \frac{H}{3}$$

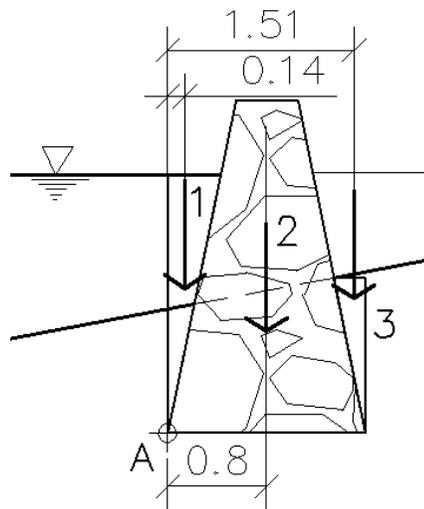
$$M_{Pa} = 0,43 * \frac{1,27}{3} = 0,18 \text{ ton * m}$$

$$M_{Pp} = P_p * \frac{h}{3}$$

$$M_{Pp} = 6,62 * \frac{2,10}{3} = 4,63 \text{ ton * m}$$

- Se calcula el peso de la borda junto con los momentos resistentes con respecto al punto A, para ello se toman las dimensiones preliminares (figura 36). Se divide geoméricamente la sección transversal del muro como se muestra en la figura 40.

Figura 40. **División geométrica de la borda del tramo TD1**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Tabla XXIV. **Momentos resistentes respecto del punto A de la borda del tramo TD1**

Figura	Área (m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (ton/m <sup>3</sup> )	W (ton/m)	Brazo (m)	Momento (ton*m)
1	0,45	1,00	0,45	0,14	0,06
2	2,84	2,20	6,24	0,80	4,99
3	0,16	1,60	0,26	1,51	0,40
TOTAL			Wt = 6,95		5,45

Fuente: elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran los resultados tanto de las cargas como de los momentos que se obtuvieron en los cálculos anteriores.

Tabla XXV. **Cálculo de presiones y momentos aplicados en la borda del tramo TD1**

Pa (carga del suelo)	0,43 ton/m
Pp (carga del agua)	6,62 ton/m
MPa (momento generado por la carga del suelo)	0,18 ton*m
MPp (momento generado por la carga del agua)	4,63 ton*m
Mw (momentos resistentes respecto del punto A)	5,45 ton*m

Fuente: elaboración propia.

- Comprobación de estabilidad contra volteo.

$$FS = \frac{\text{momentos resistentes}}{\text{momentos actuantes}}$$

$$FS = \frac{M_w + MP_p}{MP_a}$$

$$FS = \frac{5,45 + 4,63}{0,18} = 56,00$$

$$FS = 56,00 > 1,5$$

El factor de seguridad de volteo Fs si cumple.

#### 5.4.4. Comprobación por deslizamiento

Este fenómeno provoca que la borda tienda a moverse sobre un plano horizontal, provocando serias fallas y desequilibrio.

Debido a esto se recomienda un factor de seguridad entre las fuerzas resistentes y las actuantes.

$$FS = \frac{\text{fuerzas resistentes}}{\text{fuerzas actuantes}} \geq 1,5$$

Como se observa en la figura 39 las fuerzas horizontales involucradas son la carga activa, carga pasiva y la carga debido a la fricción entre la borda y el suelo.

Se calcula la carga debido a la fricción entre la borda y el suelo, el coeficiente de deslizamiento entre la borda y el suelo es de 0,40, por lo tanto:

$$F_f = W_m * 0,40$$

$$F_f = 6,95 * 0,40 = 2,78 \text{ ton}$$

Haciendo la comprobación de la borda contra el deslizamiento, los valores de las cargas actuantes se tomaron de la tabla XXV, calculadas anteriormente.

$$FS = \frac{F_f + P_p}{P_a}$$

$$FS = \frac{2,78 + 6,62}{0,43} = 22,06$$

$$FS = 22,06 > 1,5$$

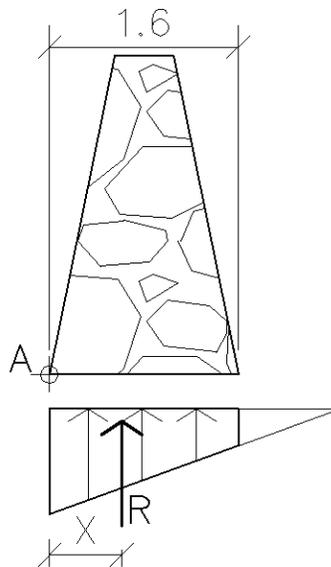
El factor de seguridad al deslizamiento FS si cumple.

#### 5.4.5. Comprobación por presiones

El peso de la borda y el empuje vertical producen sobre el terreno una presión, la cual por ninguna circunstancia debe exceder el valor soporte admisible del terreno, tampoco debe producir esfuerzos de tensión.

Esta verificación se realiza al igual que en las cimentaciones, tomando en cuenta que la resultante del peso y el empuje vertical debe actuar en el núcleo de la sección de la base del muro. El valor soporte del suelo se asumió de 22 ton/m<sup>2</sup>. Se calcula la distancia "x" donde actúa la resultante de las cargas verticales, ver figura 41.

Figura 41. Diagrama de presiones en la base del muro



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

$$x = \frac{\sum Ma}{Wt}$$

$$x = \frac{MPp + Mw - MPa}{Wt}$$

$$x = \frac{4,63 + 5,45 - 0,18}{6,95} = 1,425 \text{ m}$$

Donde la excentricidad "e" es:

$$e = \frac{b}{2} - x$$

$$e = \frac{1,60}{2} - 1,425 = -0,625 \text{ m}$$

Las presiones en el terreno serán:

$$q = \frac{Wt}{L * b} \pm \frac{Wt * e}{S}$$

Donde:

q = presiones en el terreno en ton/m<sup>2</sup>

Wt = peso total del muro en ton

L = largo del muro en m

b = base del muro en m

e = excentricidad en m

S = módulo de la sección por metro lineal

$$S = \frac{1}{6} hb^2$$

Donde:

S = módulo de la sección por metro lineal

h = largo del muro en m

b = base del muro en m

$$S = \frac{1}{6} (1,00) * (1,60)^2 = 0,427 \text{ m}^3$$

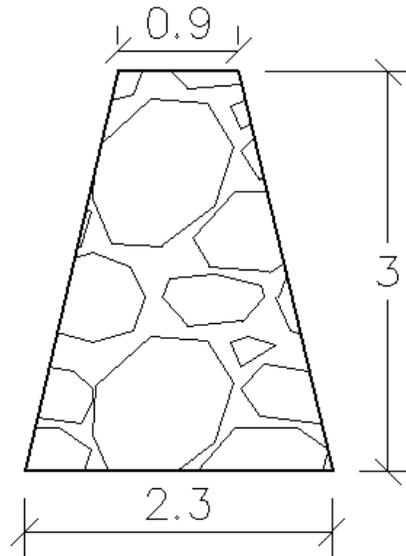
$$q_{\max} = \frac{6,95}{1,6} + \frac{6,95 * -0,625}{0,427} = -5,83 \text{ ton/m}^2$$

$$q_{\min} = \frac{6,95}{1,6} - \frac{6,95 * -0,625}{0,427} = 14,52 \text{ ton/m}^2$$

Con las dimensiones propuestas de la borda para el tramo TD1, existen presiones negativas, según los cálculos anteriores. Por ende, se procede a aumentar las dimensiones de la borda, realizando nuevamente las verificaciones por volteo, deslizamiento y presión para las nuevas dimensiones.

Las nuevas dimensiones de la borda para el tramo TD1 verifican tanto para volteo, deslizamiento y por presiones, por lo tanto, son correctas.

Figura 42. **Sección típica de la borda del tramo TD1**

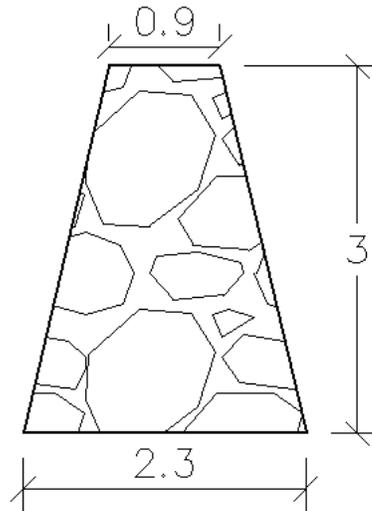


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

El tramo TD1 tiene una longitud total de 176 m, empezando de la estación 0+161 a la 0+337 del lado izquierdo (viniendo a favor de la corriente del río).

Aplicando el mismo procedimiento de diseño para los demás tramos de desbordamiento, los detalles de la sección típica de los tramos TD2, TD3, TD4, TD5, TD6 y TD7 se representan en las figuras 43 a la 48, respectivamente, y en los planos No. 5 y 6.

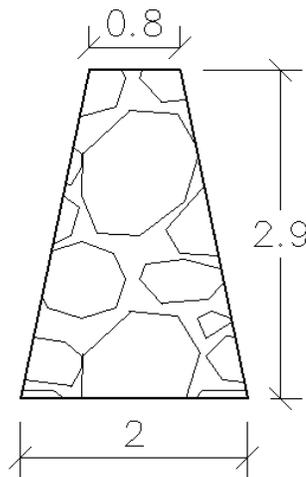
Figura 43. **Sección típica de la borda del tramo TD2**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

El tramo TD2 tiene una longitud total de 220 m, empezando de la estación 0+632 a la 0+412 del lado izquierdo (viniendo a favor de la corriente del río).

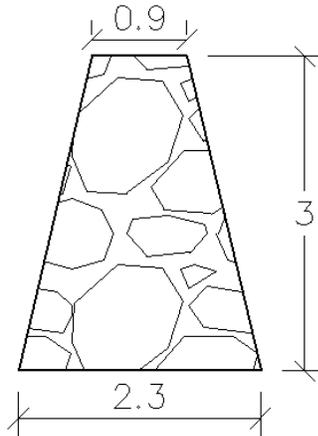
Figura 44. **Sección típica de la borda del tramo TD3**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

El tramo TD3 tiene una longitud total de 94 m, empezando de la estación 0+918 a la 1+012 del lado izquierdo (viniendo a favor de la corriente del río).

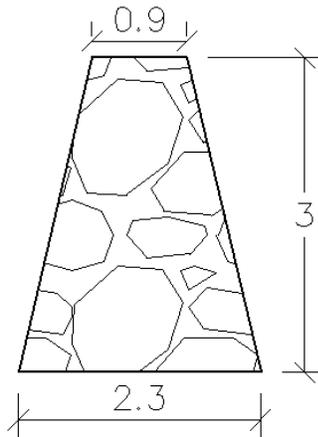
Figura 45. **Sección típica de la borda del tramo TD4**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

El tramo TD4 tiene una longitud total de 97 m, empezando de la estación 1+101 a la 1+198 del lado izquierdo (viniendo a favor de la corriente del río).

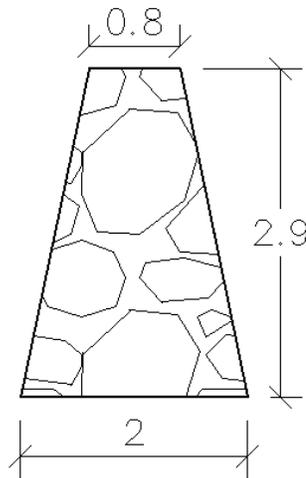
Figura 46. **Sección típica de la borda del tramo TD5**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

El tramo TD5 tiene una longitud total de 106 m, empezando de la estación 0+725 a la 0+831 del lado derecho (viniendo a favor de la corriente del río).

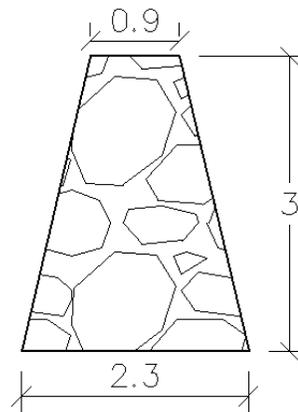
Figura 47. **Sección típica de la borda del tramo TD6**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

El tramo TD6 tiene una longitud total de 140 m, empezando de la estación 0+917 a la 1+057 del lado derecho (viniendo a favor de la corriente del río).

Figura 48. **Sección típica de la borda del tramo TD7**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

El tramo TD7 tiene una longitud total de 97 m, empezando de la estación 1+102 a la 1+199 del lado derecho (viniendo a favor de la corriente del río).

## 6. RECTIFICACIÓN HIDRÁULICA DE LAS OBRAS DE PROTECCIÓN PROPUESTAS

### 6.1. Realización de simulaciones del modelo HEC-RAS con las estructuras propuestas

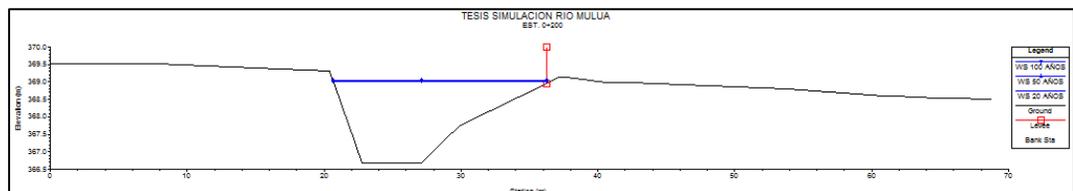
Se requiere comprobar que las crecidas del río Muluá serán contenidas por las estructuras propuestas, agregando a la simulación la sección típica de las bordas, para comprobar de manera hidráulica su funcionamiento.

### 6.2. Resultado gráfico de las secciones transversales del río Muluá

El río mantiene su desplazamiento dentro del cauce, evitando así el desbordamiento para cada uno de los caudales de diseño, por lo que la borda propuesta en los tramos de desbordamiento soporta el tirante de crecida máxima, teniendo un margen de seguridad confiable.

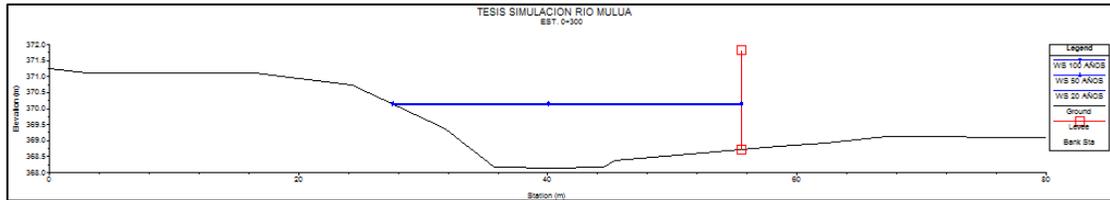
Secciones de simulación con las obras propuestas del tramo TD1:

Figura 49. Simulación con las obras propuestas en la estación 0+200



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

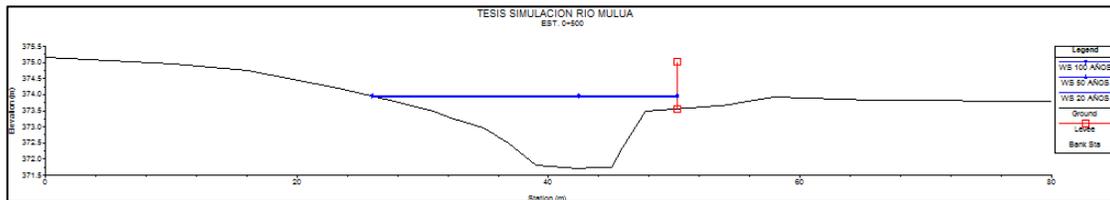
Figura 50. **Simulación con las obras propuestas en la estación 0+300**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

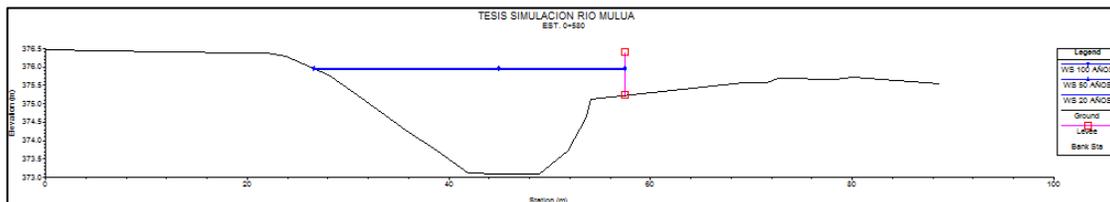
Secciones de simulación con las obras propuestas del tramo TD2:

Figura 51. **Simulación con las obras propuestas en la estación 0+500**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

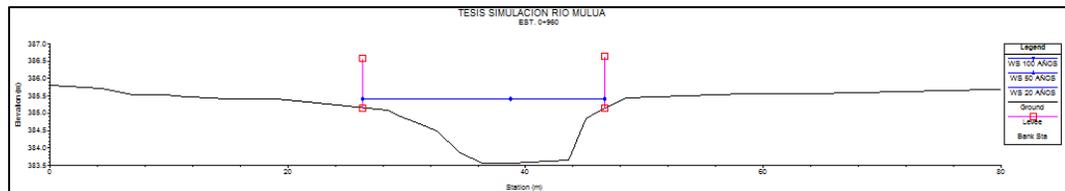
Figura 52. **Simulación con las obras propuestas en la estación 0+580**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

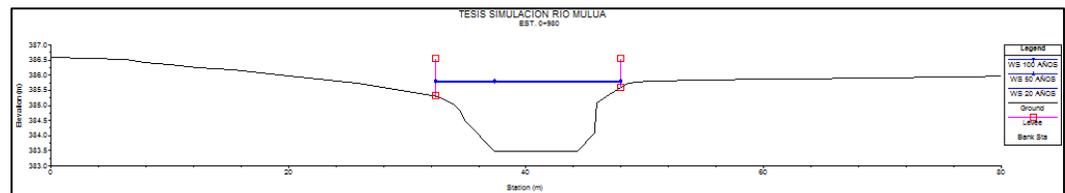
Secciones de simulación con las obras propuestas del tramo TD3 y TD6:

Figura 53. **Simulación con las obras propuestas en la estación 0+960**



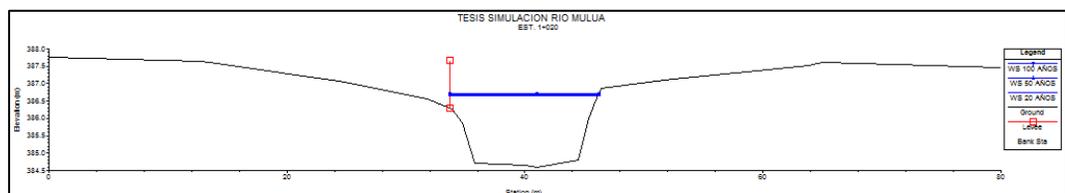
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 54. **Simulación con las obras propuestas en la estación 0+980**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

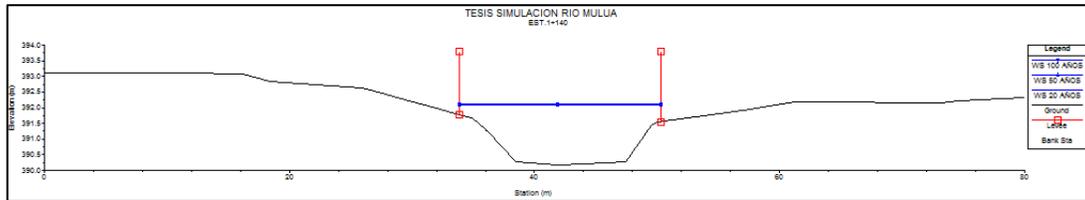
Figura 55. **Simulación con las obras propuestas en la estación 1+020**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

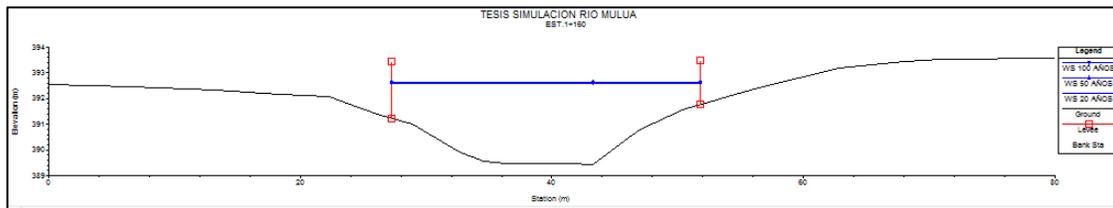
Secciones de simulación con las obras propuestas del tramo TD4 y TD7:

Figura 56. **Simulación con las obras propuestas en la estación 1+140**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

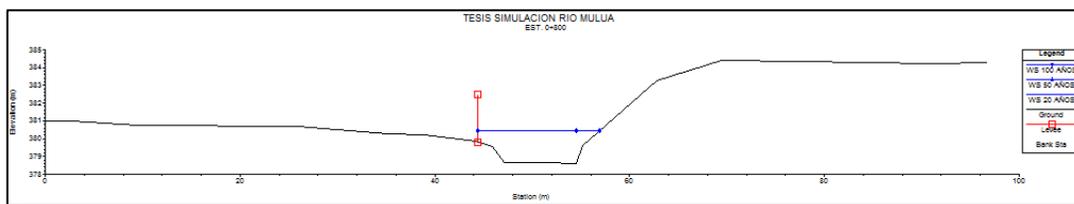
Figura 57. **Simulación con las obras propuestas en la estación 1+160**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Secciones de simulación con las obras propuestas del tramo TD5:

Figura 58. **Simulación con las obras propuestas en la estación 0+800**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

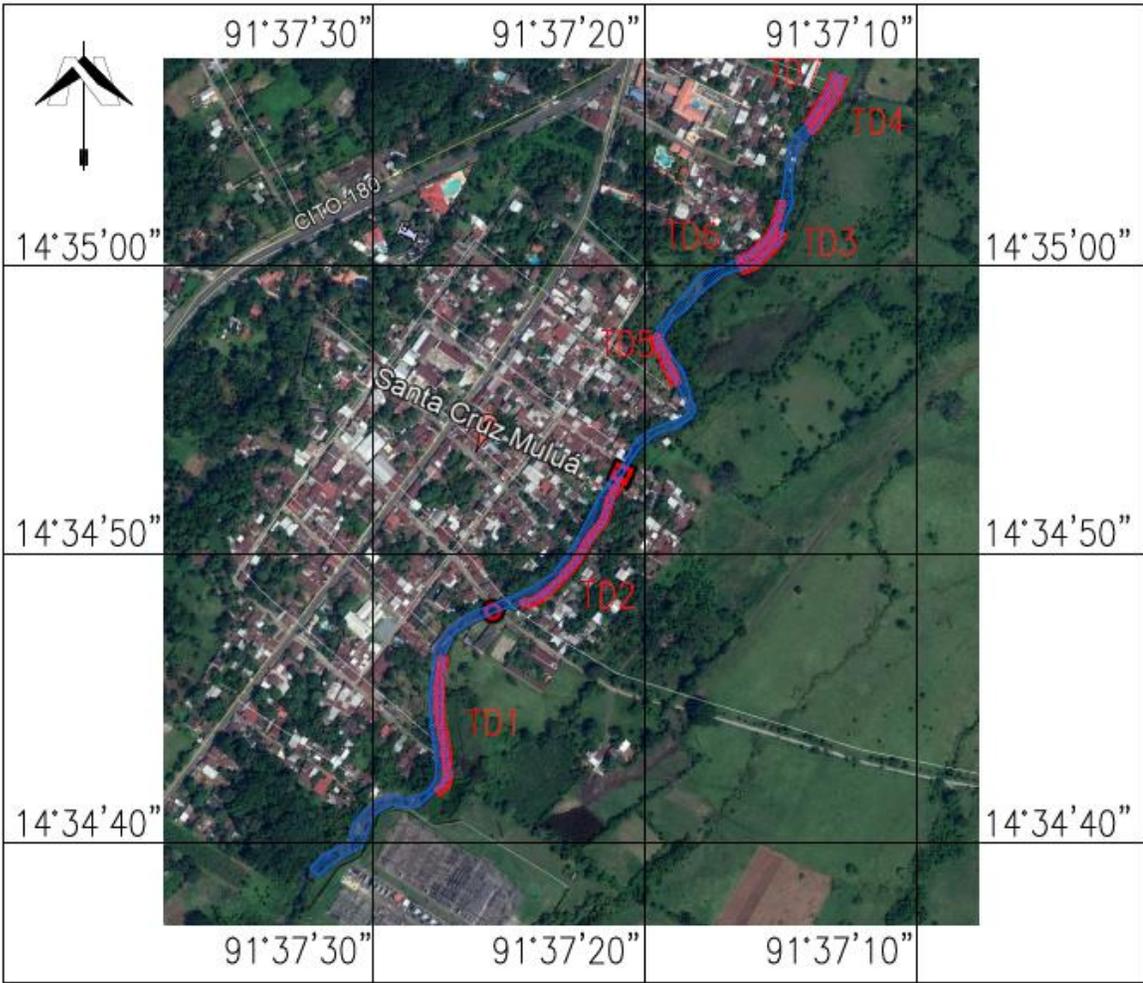
Las secciones transversales de la simulación con las obras propuestas se encuentran en los planos No. 7 y 8.

### **6.3. Conclusiones de la modelación hidráulica con el software HEC-RAS**

La simulación presenta datos hidráulicos del río Muluá, tales como la crecida máxima para los diferentes caudales de diseño, la velocidad, el área y el número de Froude, para cada una de las secciones del río, pudiendo así formarse una idea del comportamiento de este.

En conclusión, se considera que las bordas propuestas para cada uno de los tramos de desbordamiento del río Muluá, son una solución viable para evitar dichos desbordamientos que se puedan generar a la hora de intensas lluvias en el área. Así se permite un desfogue adecuado del caudal, evitando que el río se desborde, como se muestra en la figura 59.

Figura 59. **Proyección de las obras de protección propuestas en el río Muluá**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

## CONCLUSIONES

1. Se determinó, por medio del método racional, caudales de crecida con periodos de retorno de 20, 50 y 100 años, dando como resultado 78,78 m<sup>3</sup>/s, 80,62 m<sup>3</sup>/s y 81,10 m<sup>3</sup>/s respectivamente.
2. Con base a la información topográfica del lugar y al análisis del caudal de crecida, se determinó zonas de desbordamiento del río, descritas en el inciso 4.4.1., a partir de simulaciones hidráulicas hechas con el programa HEC-RAS.
3. Se propone el diseño de bordas para contener el desbordamiento del río, para los tramos TD3 y TD6 se proponen bordas con alturas de 2,90 metros; para los tramos TD1, TD2, TD4, TD5 y TD7 se proponen bordas con alturas de 3,00 metros.
4. La simulación con las obras propuestas para cada uno de los tramos de desbordamiento del río Muluá, demuestra que dan un desfogue adecuado al caudal, evitando así que el río se desborde.



## RECOMENDACIONES

1. Elaborar un plan de ordenamiento territorial en la comunidad de Santa Cruz Muluá, Retalhuleu, para evitar que la población establezca sus viviendas en zonas vulnerables a inundación o cualquier otro desastre natural.
2. Que la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED) y la municipalidad de Santa Cruz Muluá, implementen el sistema de protección de bordas para evitar el desbordamiento del río Muluá.
3. Las obras de protección diseñadas en este estudio son una aproximación de las obras finales, las cuales, para su diseño, requieren de un estudio de suelos del lugar y análisis estructural.
4. Es de suma importancia ampliar y mejorar la red de estaciones meteorológicas del país, para así obtener datos más verídicos en este tipo de estudios.



## BIBLIOGRAFÍA

1. AUVINET, Gabriel. *Diseño de bordos de protección*. México: Instituto de Ingeniería UNAM, 2011. 88 p.
2. CARRILLO MUÑOZ, Victoria Yasmina Raquel. *Propuesta de obras de protección para inundaciones provocadas por el río Guacalate en Masagua, Escuintla*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2014. 94 p.
3. INSIVUMEH. *Análisis regional de crecidas en la República de Guatemala*, Guatemala, 2004. 17p.
4. LEONARDO NANIA, Emilio Morelo. *Manual básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRAS 3.1.1. Curso de especialización de Modelación de ríos con HEC-RAS y SIG*. Área de Ingeniería Hidráulica y Área de Urbanismo y Ordenación del Territorio, Universidad de Granada, España, 1997. 59 p.
5. PÉREZ GARCÍA, Luis Felipe. *Diseño de alcantarillado sanitario para el barrio las estrellas, y muro de contención, graderíos y cubierta de la cancha de basket ball del instituto nacional de educación básica, municipio de Barberena, Santa Rosa*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010. 184 p.

6. U.S. Army Corps of Engineers. *Design of rip rap revetment*. Hydraulic Engineering, Circular No. 11, 1989. 193 p.
7. VILLÓN BÉJAR, Máximo. *Hidrología*. 2a. ed. Perú: Editorial Villón, 2002. 429p.

## APÉNDICES

### Apéndice 1. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+000**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	358,16	359,96	3,74	21,05	1,01
50	80,62	358,16	359,99	3,77	21,41	1,01
100	81,10	358,16	359,99	3,77	21,50	1,01

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

### Apéndice 2. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+020**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	358,59	360,65	2,54	30,98	0,61
50	80,62	358,59	360,68	2,56	31,46	0,61
100	81,10	358,59	360,68	2,57	31,58	0,61

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 3. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+040**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	359,31	360,65	4,92	16,02	1,47
50	80,62	359,31	360,66	4,96	16,25	1,48
100	81,10	359,31	360,67	4,97	16,31	1,48

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 4. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+060**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	360,35	361,34	7,86	10,03	2,93
50	80,62	360,35	361,36	7,88	10,23	2,92
100	81,10	360,35	361,36	7,89	10,28	2,91

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 5. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+080**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	363,81	365,28	3,47	22,72	1,01
50	80,62	363,81	365,30	3,48	23,14	1,01
100	81,10	363,81	365,30	3,49	23,25	1,00

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 6. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+100**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	364,24	365,95	2,62	30,07	0,80
50	80,62	364,24	365,98	2,61	30,87	0,79
100	81,10	364,24	365,99	2,61	31,10	0,79

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 7. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+120**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	364,51	366,16	3,29	23,94	0,91
50	80,62	364,51	366,19	3,31	24,39	0,92
100	81,10	364,51	366,19	3,31	24,50	0,92

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 8. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+140**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	364,68	366,46	4,60	17,13	1,38
50	80,62	364,68	366,48	4,60	17,53	1,38
100	81,10	364,68	366,49	4,60	17,64	1,38

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 9. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+160**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	365,56	367,77	3,22	24,50	1,00
50	80,62	365,56	367,81	3,18	25,33	1,00
100	81,10	365,56	367,81	3,18	25,50	1,00

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 10. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+180**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	366,15	367,84	4,50	17,51	1,44
50	80,62	366,15	367,86	4,48	17,99	1,43
100	81,10	366,15	367,87	4,47	18,15	1,43

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 11. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+200**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	366,69	369,09	2,79	32,60	0,75
50	80,62	366,69	369,12	2,76	33,61	0,74
100	81,10	366,69	369,12	2,77	33,77	0,74

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 12. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+220**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	366,85	369,29	2,84	27,77	0,70
50	80,62	366,85	369,30	2,89	27,88	0,71
100	81,10	366,85	369,30	2,91	27,91	0,72

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 13. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+240**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	367,30	369,72	1,61	49,00	0,41
50	80,62	367,30	369,75	1,62	49,77	0,41
100	81,10	367,30	369,75	1,63	49,97	0,41

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 14. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+260**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	367,61	369,79	1,70	47,28	0,42
50	80,62	367,61	369,81	1,71	48,06	0,42
100	81,10	367,61	369,82	1,71	48,27	0,42

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 15. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+280**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	368,12	369,85	2,08	39,75	0,60
50	80,62	368,12	369,88	2,07	40,91	0,59
100	81,10	368,12	369,88	2,07	41,21	0,59

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 16. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+300**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	368,15	370,08	1,20	66,21	0,30
50	80,62	368,15	370,10	1,21	67,26	0,30
100	81,10	368,15	370,10	1,21	67,53	0,30

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 17. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+320**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	368,53	370,05	3,65	21,60	1,04
50	80,62	368,53	370,08	3,66	22,03	1,04
100	81,10	368,53	370,08	3,67	22,12	1,04

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 18. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+340**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	369,02	370,71	3,37	23,41	1,14
50	80,62	369,02	370,72	3,40	23,73	1,14
100	81,10	369,02	370,72	3,41	23,80	1,14

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 19. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+360**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	369,85	371,41	3,04	25,92	1,01
50	80,62	369,85	371,43	3,04	26,50	1,00
100	81,10	369,85	371,44	3,04	26,66	1,00

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 20. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+380**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	370,13	371,85	2,98	26,46	0,85
50	80,62	370,13	371,86	3,02	26,69	0,86
100	81,10	370,13	371,87	3,03	26,74	0,87

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 21. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+400**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	370,20	372,32	2,20	35,86	0,62
50	80,62	370,20	372,35	2,21	36,55	0,62
100	81,10	370,20	372,35	2,21	36,72	0,62

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 22. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+420**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	370,36	372,50	2,32	33,97	0,66
50	80,62	370,36	372,52	2,33	34,62	0,66
100	81,10	370,36	372,52	2,33	34,77	0,66

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 23. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+440**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	370,71	372,66	2,57	30,60	0,69
50	80,62	370,71	372,68	2,60	31,05	0,69
100	81,10	370,71	372,69	2,60	31,16	0,69

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 24. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+460**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	371,19	373,03	1,79	44,80	0,54
50	80,62	371,19	373,05	1,79	46,19	0,53
100	81,10	371,19	373,06	1,79	46,55	0,53

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 25. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+480**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	371,23	372,80	4,21	18,71	1,35
50	80,62	371,23	372,83	4,21	19,14	1,35
100	81,10	371,23	372,83	4,21	19,26	1,34

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 26. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+500**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	371,72	373,94	2,61	32,31	0,79
50	80,62	371,72	373,95	2,63	32,99	0,79
100	81,10	371,72	373,95	2,63	33,17	0,79

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 27. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+520**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	371,81	374,20	2,34	34,74	0,56
50	80,62	371,81	374,21	2,38	35,08	0,57
100	81,10	371,81	374,21	2,39	35,16	0,57

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 28. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+540**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	372,70	374,29	4,31	18,29	1,24
50	80,62	372,70	374,31	4,35	18,55	1,25
100	81,10	372,70	374,31	4,35	18,63	1,25

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 29. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+560**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	373,39	375,12	3,81	20,69	1,02
50	80,62	373,39	375,16	3,79	21,25	1,00
100	81,10	373,39	375,17	3,79	21,42	1,00

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 30. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+580**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	373,07	375,92	1,38	65,37	0,30
50	80,62	373,07	375,96	1,37	67,34	0,29
100	81,10	373,07	375,96	1,37	67,86	0,29

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 31. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+600**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	373,30	375,76	2,88	27,45	0,67
50	80,62	373,30	375,79	2,91	27,88	0,67
100	81,10	373,30	375,79	2,92	28,00	0,67

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 32. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+620**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	373,38	375,91	3,26	24,14	0,72
50	80,62	373,38	375,93	3,30	24,40	0,73
100	81,10	373,38	375,94	3,31	24,47	0,73

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 33. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+640**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	373,24	376,36	2,37	33,24	0,49
50	80,62	373,24	376,39	2,39	33,71	0,49
100	81,10	373,24	376,40	2,40	33,84	0,49

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 34. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+660**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	374,43	376,32	3,48	22,64	0,95
50	80,62	374,43	376,36	3,45	23,38	0,94
100	81,10	374,43	376,38	3,44	23,58	0,94

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 35. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+680**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	374,56	375,85	5,81	13,56	2,02
50	80,62	374,56	375,86	5,84	13,81	2,02
100	81,10	374,56	375,86	5,85	13,87	2,02

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 36. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+700**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	376,21	377,94	3,58	22,01	1,01
50	80,62	376,21	377,96	3,60	22,42	1,01
100	81,10	376,21	377,97	3,60	22,52	1,01

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 37. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+720**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	375,41	378,55	2,33	33,88	0,47
50	80,62	375,41	378,57	2,36	34,21	0,48
100	81,10	375,41	378,58	2,36	34,30	0,48

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 38. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+740**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	375,52	378,79	1,46	53,92	0,30
50	80,62	375,52	378,82	1,48	54,60	0,30
100	81,10	375,52	378,83	1,48	54,77	0,30

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 39. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+760**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	377,30	378,59	3,72	21,20	1,30
50	80,62	377,30	378,60	3,75	21,48	1,31
100	81,10	377,30	378,60	3,76	21,55	1,31

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 40. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+780**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	378,14	379,26	5,02	16,63	1,59
50	80,62	378,14	379,28	5,05	16,96	1,58
100	81,10	378,14	379,28	5,05	17,06	1,58

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 41. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+800**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	378,61	380,46	4,22	21,41	1,03
50	80,62	378,61	380,47	4,29	21,55	1,04
100	81,10	378,61	380,47	4,31	21,58	1,05

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 42. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+820**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	379,12	380,86	4,60	17,11	1,19
50	80,62	379,12	380,89	4,63	17,39	1,19
100	81,10	379,12	380,89	4,64	17,47	1,19

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 43. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+840**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	379,73	381,70	4,17	18,88	1,01
50	80,62	379,73	381,73	4,20	19,19	1,01
100	81,10	379,73	381,74	4,21	19,27	1,01

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 44. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+860**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	380,42	382,55	2,93	26,88	0,74
50	80,62	380,42	382,59	2,93	27,52	0,73
100	81,10	380,42	382,60	2,93	27,69	0,73

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 45. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+880**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	380,77	382,95	2,15	36,59	0,55
50	80,62	380,77	382,99	2,16	37,38	0,54
100	81,10	380,77	382,99	2,16	37,59	0,54

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 46. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+900**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	381,03	383,13	1,87	42,17	0,47
50	80,62	381,03	383,16	1,87	43,00	0,46
100	81,10	381,03	383,17	1,88	43,22	0,46

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 47. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+920**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	381,84	383,77	4,09	19,27	1,02
50	80,62	381,84	383,79	4,11	19,59	1,02
100	81,10	381,84	383,80	4,12	19,68	1,02

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 48. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+940**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	382,71	384,26	4,63	17,03	1,36
50	80,62	382,71	384,29	4,62	17,47	1,35
100	81,10	382,71	384,30	4,62	17,56	1,35

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 49. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+960**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	383,56	385,41	3,33	25,01	0,89
50	80,62	383,56	385,41	3,39	25,20	0,90
100	81,10	383,56	385,42	3,39	25,33	0,90

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 50. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 0+980**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	383,47	385,78	3,05	28,10	0,68
50	80,62	383,47	385,80	3,08	28,63	0,68
100	81,10	383,47	385,80	3,09	28,71	0,68

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 51. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 1+000**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	384,03	385,53	4,84	16,27	1,46
50	80,62	384,03	385,54	4,91	16,43	1,47
100	81,10	384,03	385,55	4,92	16,48	1,48

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 52. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 1+020**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	384,60	386,65	3,85	20,90	0,94
50	80,62	384,60	386,69	3,83	21,59	0,92
100	81,10	384,60	386,70	3,83	21,75	0,92

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 53. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 1+040**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	385,36	387,30	3,01	26,21	0,77
50	80,62	385,36	387,32	3,04	26,51	0,77
100	81,10	385,36	387,32	3,05	26,59	0,77

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 54. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 1+060**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	385,83	387,51	3,70	21,31	1,01
50	80,62	385,83	387,53	3,72	21,65	1,01
100	81,10	385,83	387,53	3,73	21,73	1,01

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 55. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 1+080**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	385,62	387,30	5,42	14,54	1,47
50	80,62	385,62	387,33	5,44	14,83	1,47
100	81,10	385,62	387,34	5,44	14,91	1,47

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 56. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 1+100**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	387,17	388,87	4,01	19,66	1,14
50	80,62	387,17	388,89	4,03	20,00	1,14
100	81,10	387,17	388,90	4,04	20,06	1,14

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 57. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 1+120**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	387,56	388,60	7,71	10,22	2,68
50	80,62	387,56	388,62	7,70	10,47	2,65
100	81,10	387,56	388,63	7,71	10,52	2,65

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 58. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 1+140**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	390,19	392,09	3,18	27,04	0,80
50	80,62	390,19	392,10	3,23	27,29	0,81
100	81,10	390,19	392,11	3,23	27,51	0,80

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

**Apéndice 59. Hidráulica fluvial del río Muluá estación 1+160**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m <sup>3</sup> /s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	389,41	392,61	1,20	72,07	0,25
50	80,62	389,41	392,63	1,21	73,46	0,25
100	81,10	389,41	392,64	1,21	73,78	0,25

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 60. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 1+180**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	390,61	392,50	2,46	31,99	0,69
50	80,62	390,61	392,52	2,48	32,52	0,69
100	81,10	390,61	392,52	2,48	32,64	0,69

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Apéndice 61. **Hidráulica fluvial del río Muluá estación 1+188**

PERÍODO DE RETORNO (años)	CAUDAL TOTAL (m3/s)	COTA CANAL MÍNIMA (m)	CRECIDA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m2)	NÚMERO DE FROUDE
20	78,78	390,89	392,25	4,01	19,64	1,26
50	80,62	390,89	392,26	4,04	19,95	1,26
100	81,10	390,89	392,27	4,05	20,03	1,26

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.



Apéndice 62. **Juego de planos del tramo de estudio**

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.



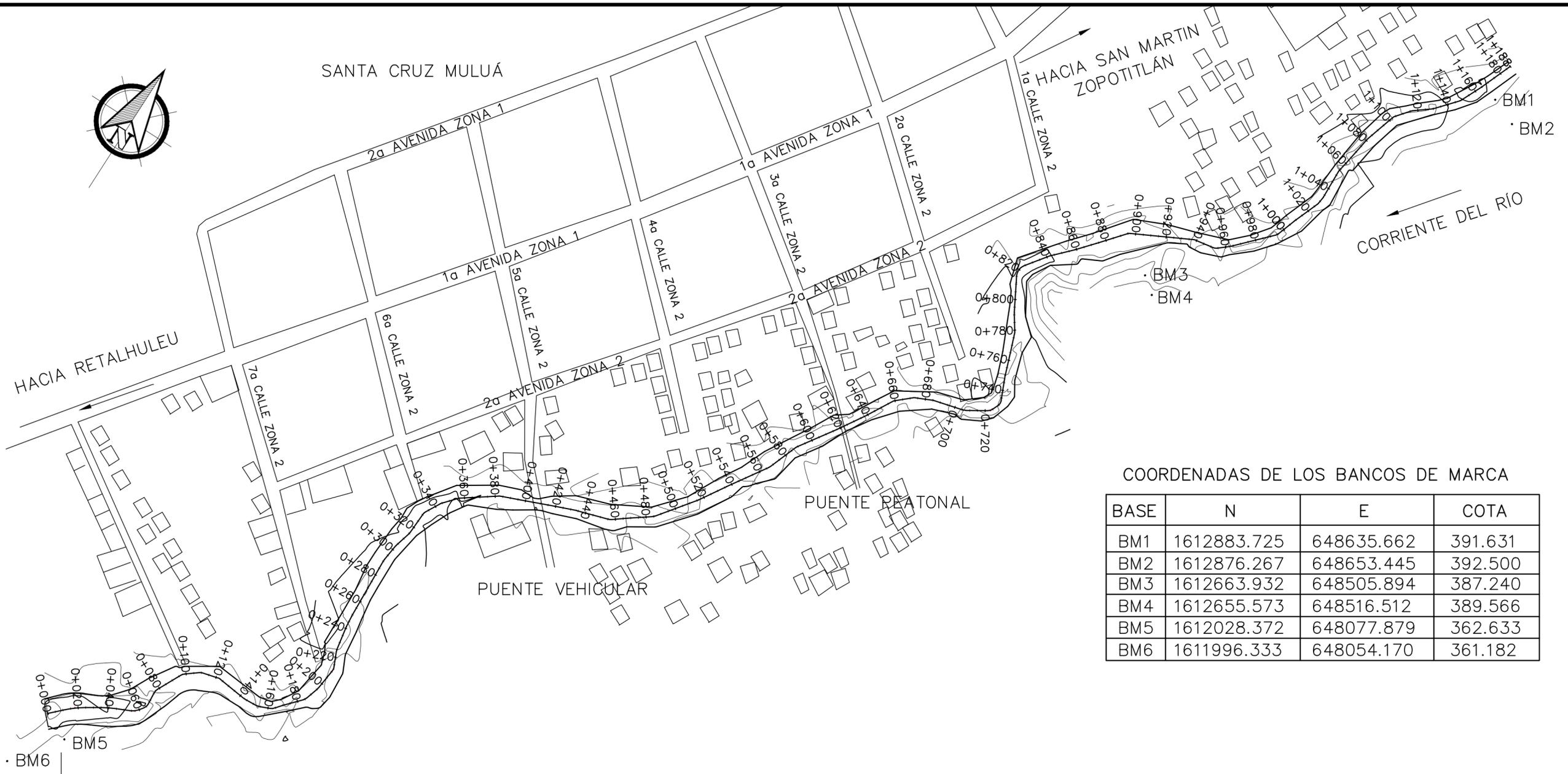


SANTA CRUZ MULUÁ

HACIA RETALHULEU

HACIA SAN MARTIN ZOPOTITLÁN

CORRIENTE DEL RÍO

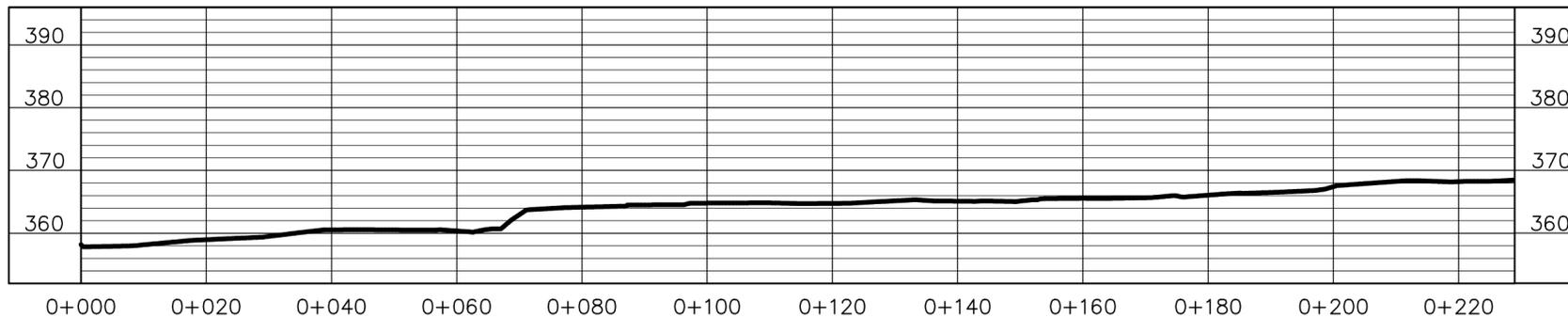


COORDENADAS DE LOS BANCOS DE MARCA

BASE	N	E	COTA
BM1	1612883.725	648635.662	391.631
BM2	1612876.267	648653.445	392.500
BM3	1612663.932	648505.894	387.240
BM4	1612655.573	648516.512	389.566
BM5	1612028.372	648077.879	362.633
BM6	1611996.333	648054.170	361.182

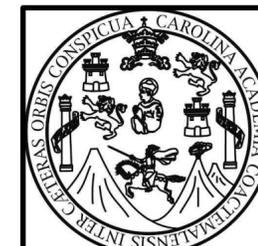
PLANTA RÍO MULUÁ DE LA EST. 0+000 A 1+188

ESC. 1:2000



PERFIL RÍO MULUÁ DE LA EST. 0+000 A 0+220

ESC. VER. 1:750  
ESC. HOR. 1:750



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN, PARA INUNDACIONES  
PROVOCADAS POR EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ,  
RETALHULEU

PLANTA – PERFIL DEL TRAMO DE ESTUDIO

PLANO DE

INDICADA  
ESCALA

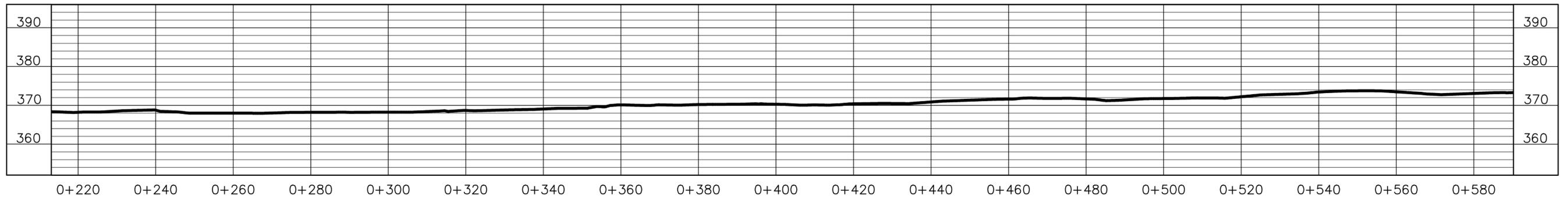
OCT.-2019  
FECHA

ERICK ALVAREZ  
DIBUJO

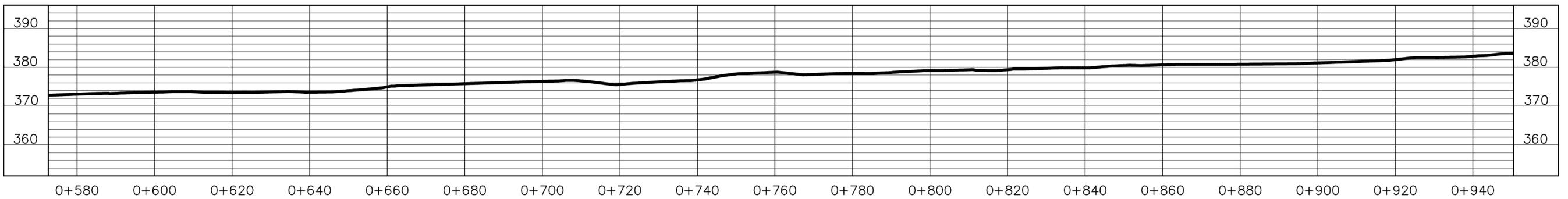
ING. CLAUDIO CASTAÑON  
ASESOR

HOJA

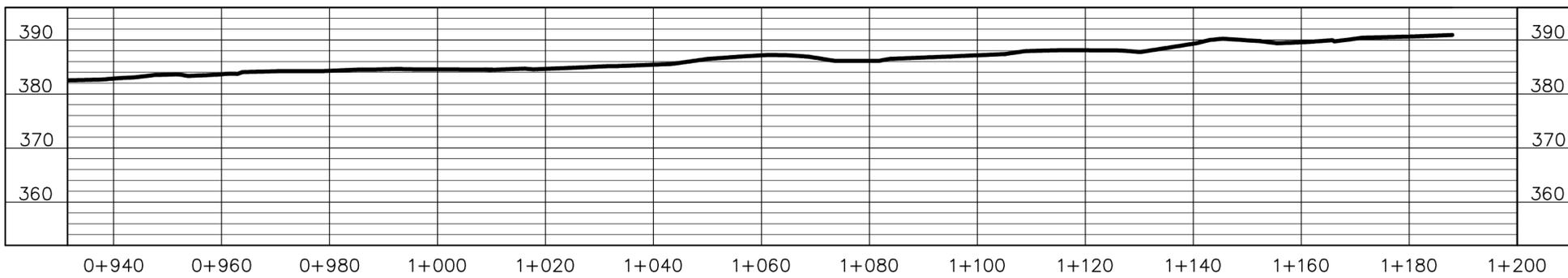
1/8



PERFIL RÍO MULUÁ DE LA EST. 0+220 A 0+580 ESC VER. 1:750  
ESC HOR. 1:750



PERFIL RÍO MULUÁ DE LA EST. 0+580 A 0+940 ESC VER. 1:750  
ESC HOR. 1:750



PERFIL RÍO MULUÁ DE LA EST. 0+940 A 1+188 ESC VER. 1:750  
ESC HOR. 1:750



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN, PARA INUNDACIONES  
PROVOCADAS POR EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ,  
RETALHULEU

PERFIL DEL TRAMO DE ESTUDIO

PLANO DE

INDICADA

OCT.-2019

ERICK ALVAREZ

ING. CLAUDIO CASTAÑON

ESCALA

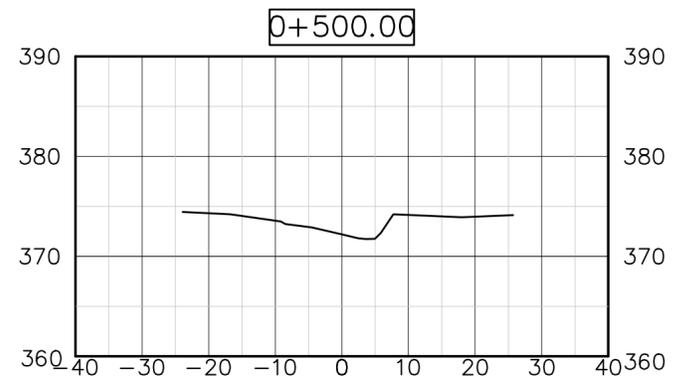
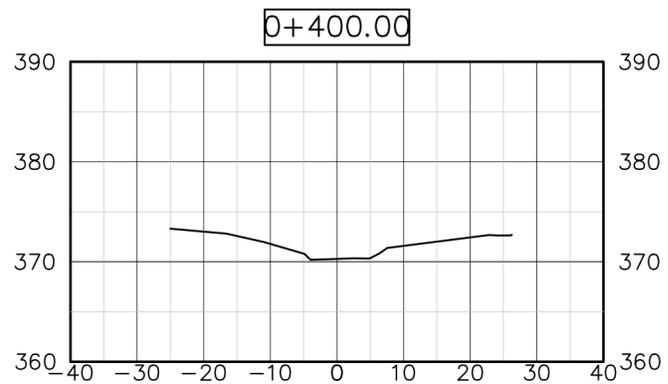
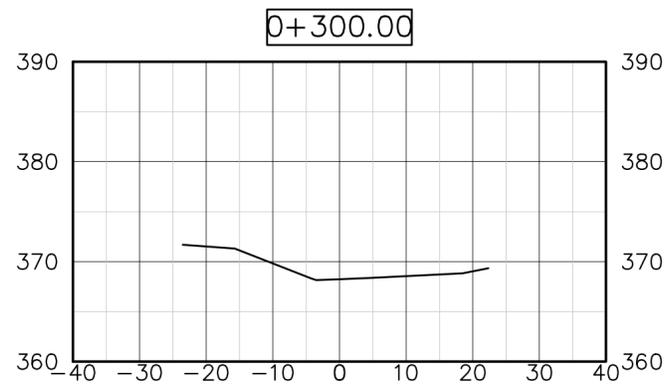
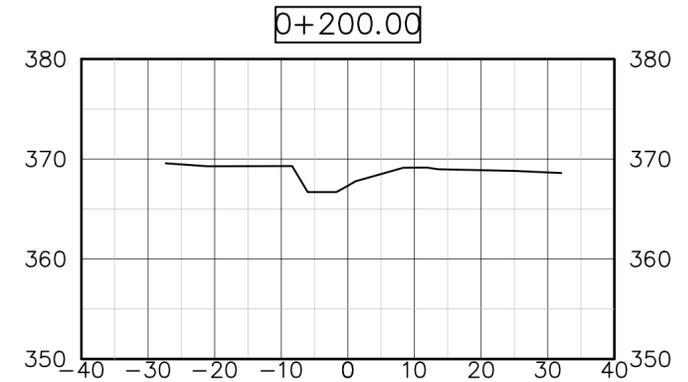
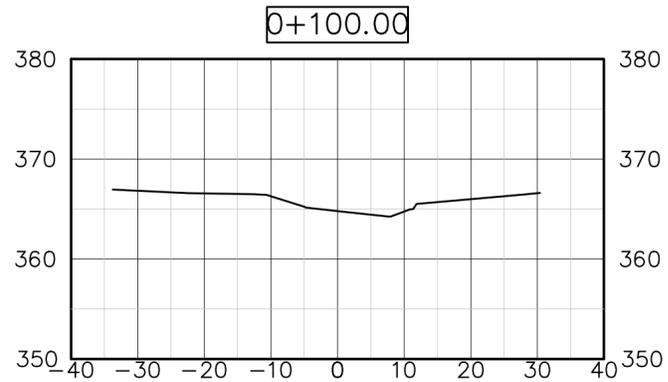
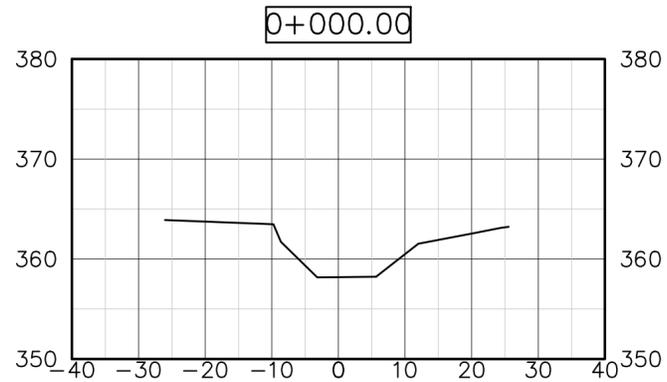
FECHA

DIBUJO

ASESOR

HOJA

2/8



SECCIONES TRANSVERSALES DE LA EST. 0+000 A 0+500 ESC. VER. 1:500  
 ESC. HOR. 1:750

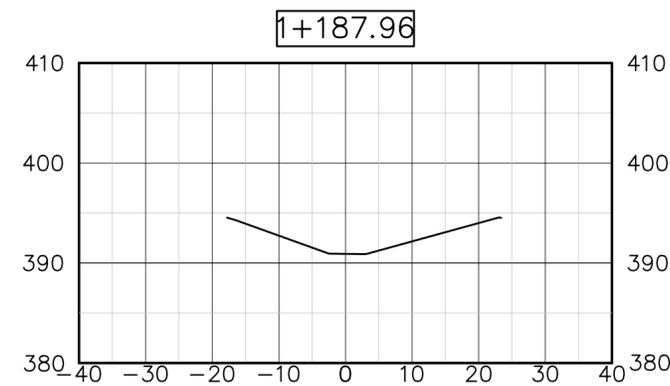
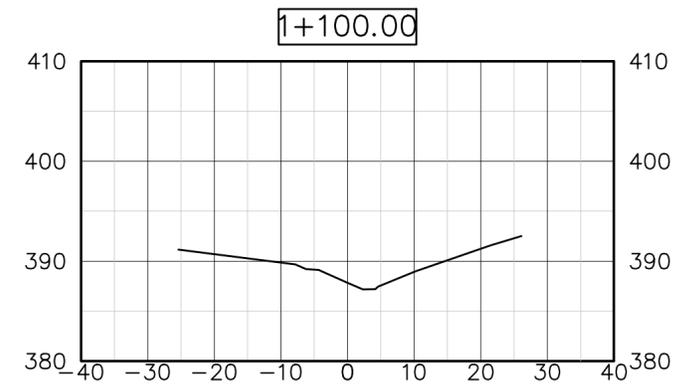
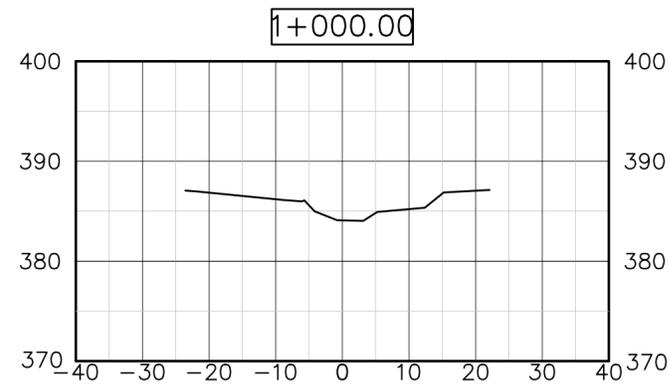
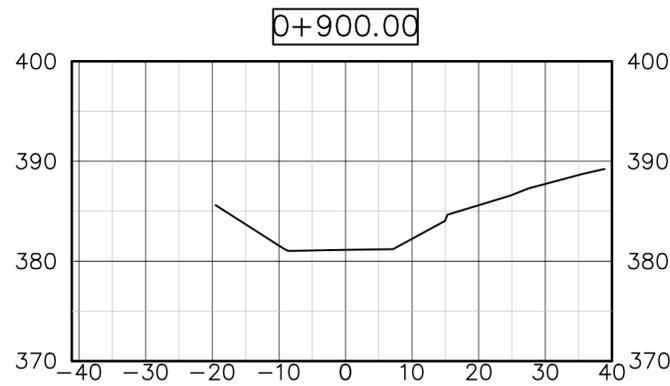
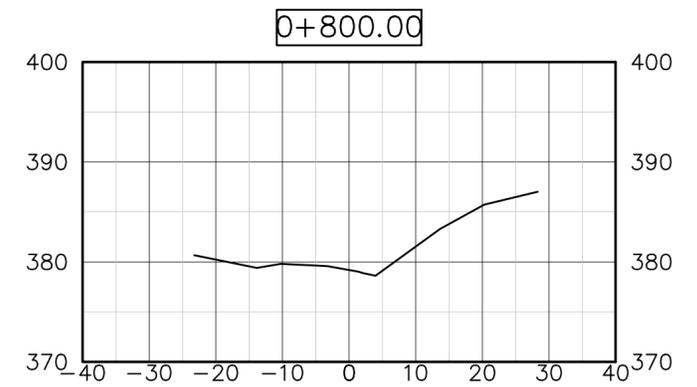
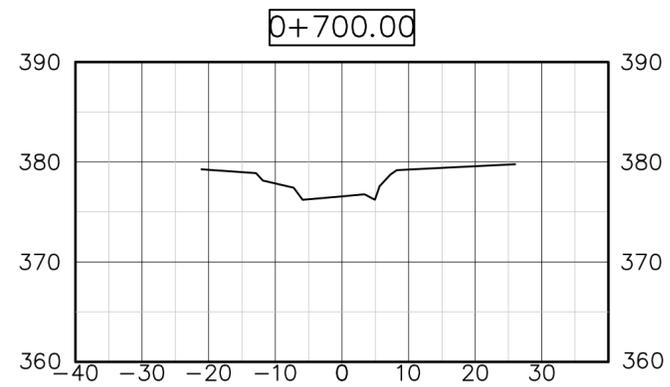
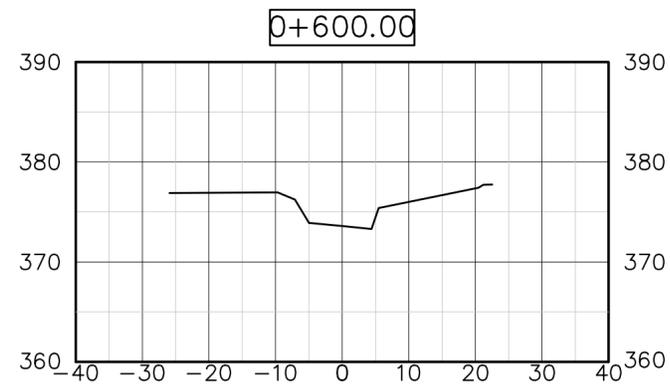


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN, PARA INUNDACIONES  
 PROVOCADAS POR EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ,  
 RETALHULEU

SECCIONES TRASVERSALES DEL TRAMO DE ESTUDIO DE LA EST. 0+000 A 0+500			
PLANO DE			
INDICADA	OCT.-2019	ERICK ALVAREZ	ING. CLAUDIO CASTAÑÓN
ESCALA	FECHA	DIBUJO	ASESOR

HOJA  
 3/8



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN, PARA INUNDACIONES  
PROVOCADAS POR EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ,  
RETALHULEU

SECCIONES TRANSVERSALES DEL TRAMO DE ESTUDIO DE LA EST.  
0+600 A 1+188

PLANO DE

HOJA

4/8

INDICADA  
ESCALA

OCT.-2019  
FECHA

ERICK ALVAREZ  
DIBUJO

ING. CLAUDIO CASTAÑÓN  
ASESOR

SECCIONES TRANSVERSALES DE LA EST. 0+600 A 1+188

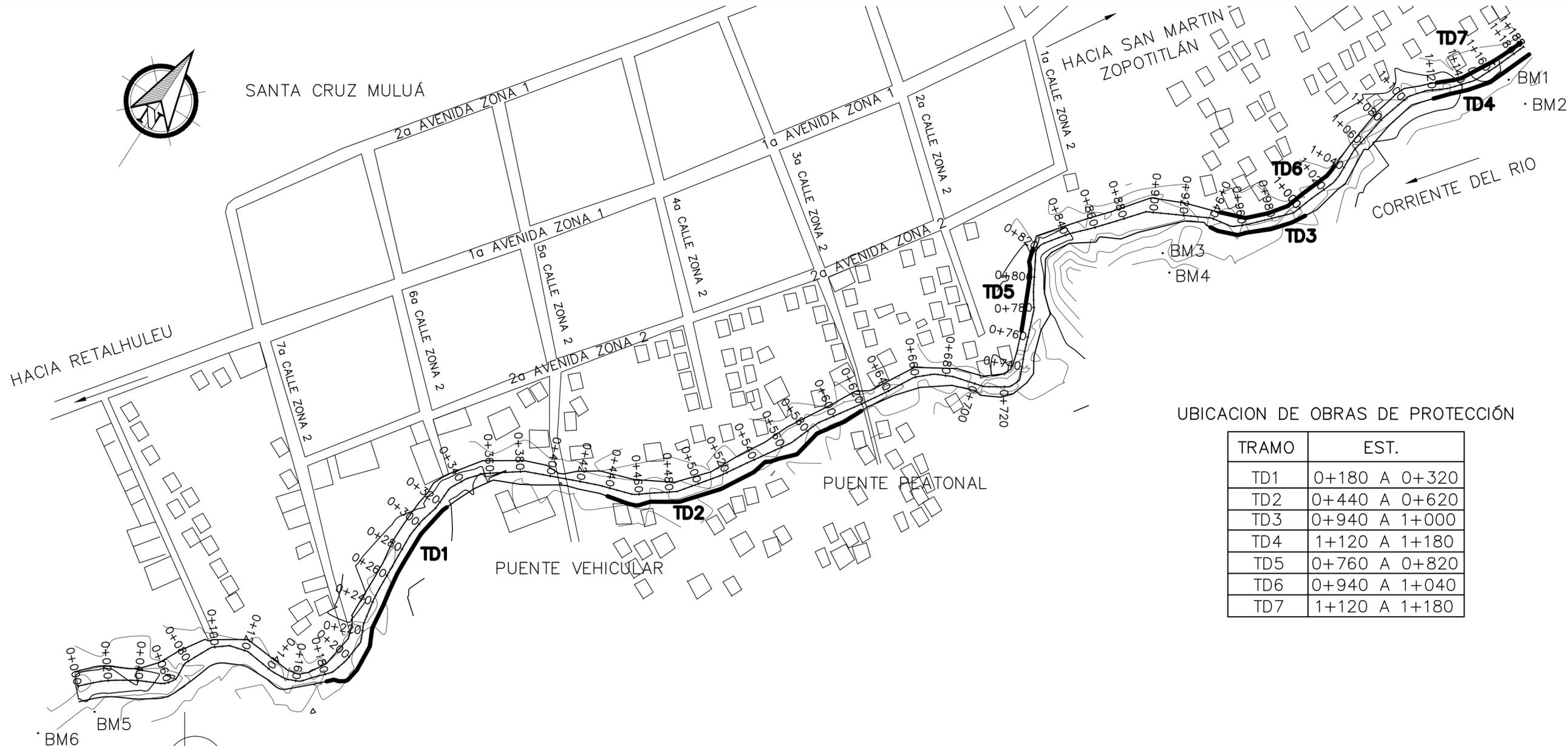
ESC VER. 1:500  
ESC HOR. 1:750



SANTA CRUZ MULUÁ

HACIA RETALHULEU

HACIA SAN MARTÍN ZOPOTITLÁN  
CORRIENTE DEL RÍO

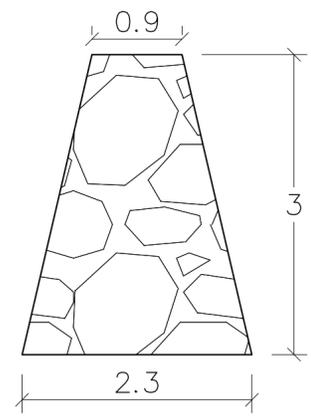


UBICACION DE OBRAS DE PROTECCIÓN

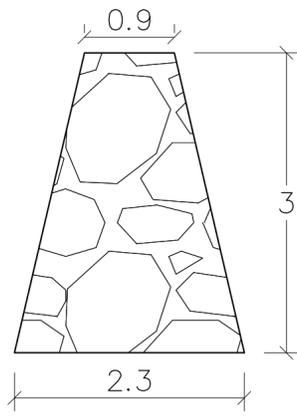
TRAMO	EST.
TD1	0+180 A 0+320
TD2	0+440 A 0+620
TD3	0+940 A 1+000
TD4	1+120 A 1+180
TD5	0+760 A 0+820
TD6	0+940 A 1+040
TD7	1+120 A 1+180

PLANTA UBICACIÓN DE OBRAS PROPUESTAS

ESC. 1: 2000



SECCIÓN TÍPICA DE BORDA  
TRAMO TD1  
ESC. 1: 50



SECCIÓN TÍPICA DE BORDA  
TRAMO TD2  
ESC. 1: 50

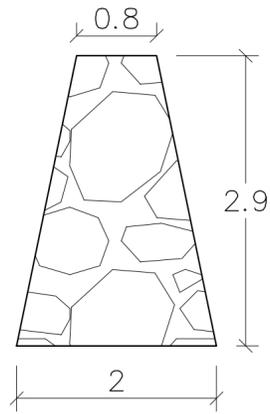


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

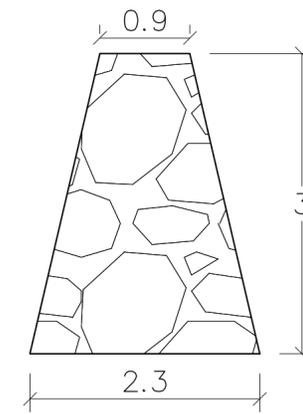
PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN, PARA INUNDACIONES  
PROVOCADAS POR EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ,  
RETALHULEU

UBICACIÓN DE OBRAS PROPUESTAS Y SECCIONES TÍPICAS DE OBRA			
PLANO DE			
INDICADA	OCT.-2019	ERICK ALVAREZ	ING. CLAUDIO CASTAÑÓN
ESCALA	FECHA	DIBUJO	ASESOR

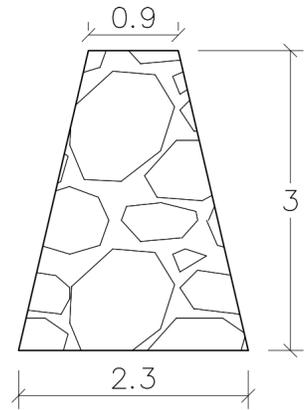
HOJA  
5/8



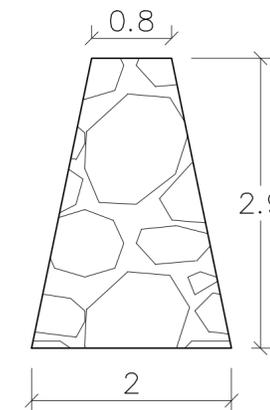
SECCIÓN TÍPICA DE BORDA TRAMO TD3  
ESC. 1:50



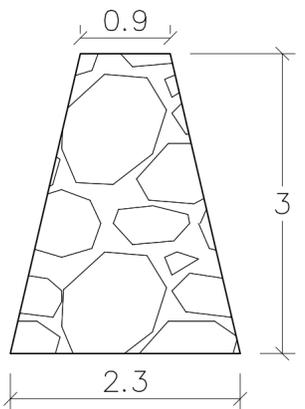
SECCIÓN TÍPICA DE BORDA TRAMO TD4  
ESC. 1:50



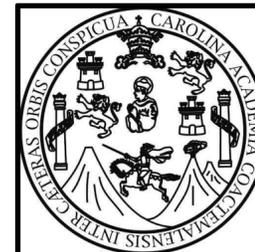
SECCIÓN TÍPICA DE BORDA TRAMO TD5  
ESC. 1:50



SECCIÓN TÍPICA DE BORDA TRAMO TD6  
ESC. 1:50



SECCIÓN TÍPICA DE BORDA TRAMO TD7  
ESC. 1:50



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN, PARA INUNDACIONES  
PROVOCADAS POR EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ,  
RETALHULEU

SECCIONES TIPICAS DE OBRA

PLANO DE

INDICADA

OCT.-2019

ERICK ALVAREZ

ING. CLAUDIO CASTAÑON

ESCALA

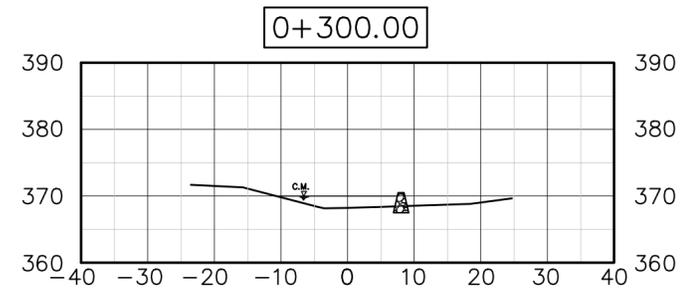
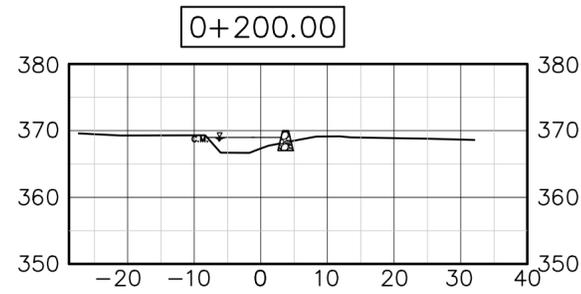
FECHA

DIBUJO

ASESOR

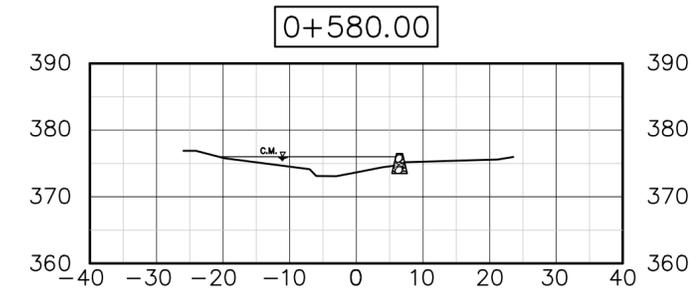
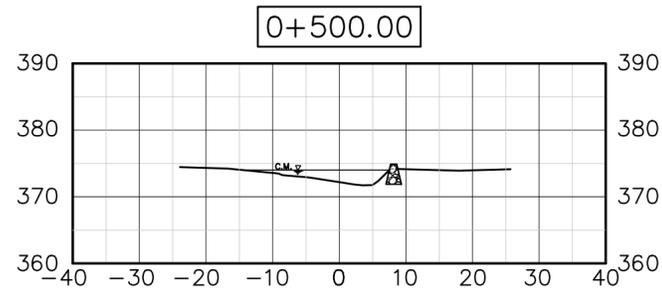
HOJA

6/8



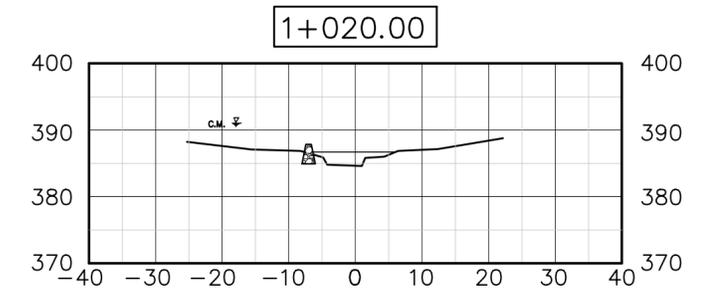
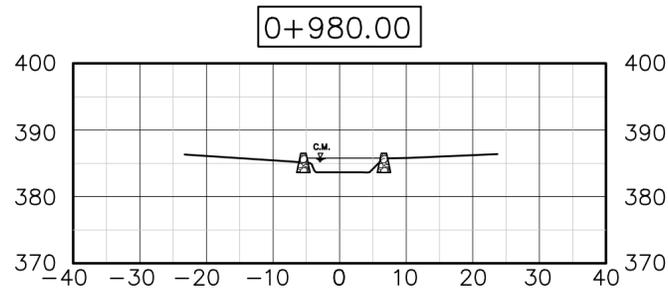
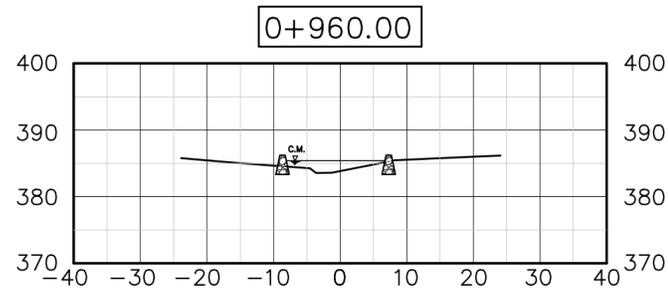
SECCIONES TRANSVERSALES TRAMO TD1

ESC HOR. Y VER. 1:750



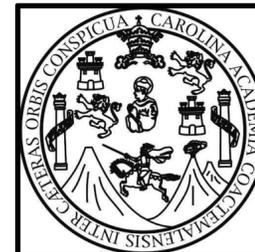
SECCIONES TRANSVERSALES TRAMO TD2

ESC HOR. Y VER. 1:750



SECCIONES TRANSVERSALES TRAMO TD3 Y TD6

ESC HOR. Y VER. 1:750



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN, PARA INUNDACIONES  
PROVOCADAS POR EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ,  
RETALHULEU

SECCIONES TRASVERSALES DEL TRAMO DE ESTUDIO CON OBRAS DE  
PROTECCION DEL TRAMO TD1, TD2, TD3 Y TD6

PLANO DE

INDICADA

OCT.-2019

ERICK ALVAREZ

ING. CLAUDIO CASTAÑON

ESCALA

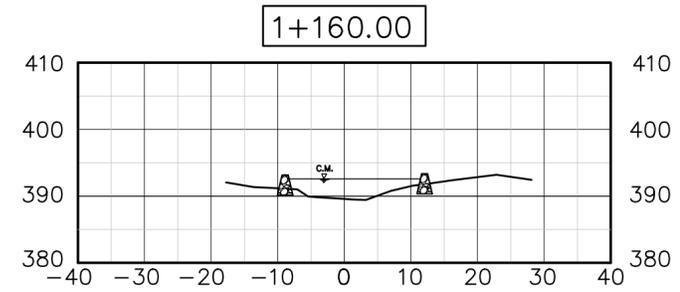
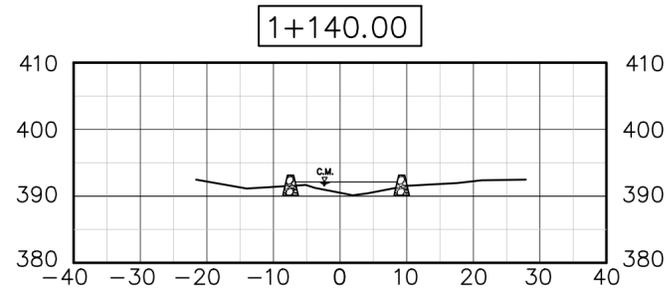
FECHA

DIBUJO

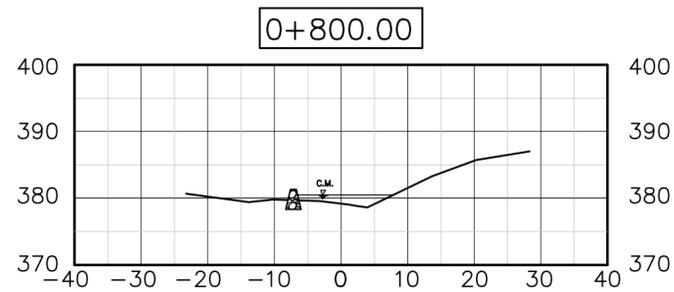
ASESOR

HOJA

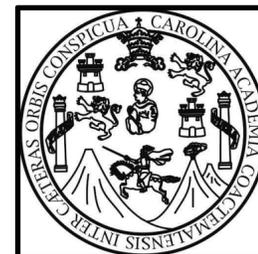
7/8



SECCIONES TRANSVERSALES TRAMO TD4 Y TD7  
 ESC HOR. Y VER. 1:750



SECCIONES TRANSVERSALES TRAMO TD5  
 ESC HOR. Y VER. 1:750



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN, PARA INUNDACIONES  
 PROVOCADAS POR EL RÍO MULUÁ EN SANTA CRUZ MULUÁ,  
 RETALHULEU

SECCIONES TRASVERSALES DEL TRAMO DE ESTUDIO CON OBRAS DE  
 PROTECCION DEL TRAMO TD4, TD5 Y TD7

PLANO DE

INDICADA

OCT.-2019

ERICK ALVAREZ

ING. CLAUDIO CASTAÑON

ESCALA

FECHA

DIBUJO

ASESOR

HOJA

8/8