

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**TESIS:**

**Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo para  
identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la  
localidad de San Miguel - La Mar, 2024**

Para optar el título profesional de:

**INGENIERA AGRÍCOLA**

PRESENTADO POR:

**Bach. Ruth LUJAN GUTIERREZ**

ASESOR:

**Mtro. Richard Alex OSCCO PECEROS**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2025**

## **DEDICATORIA**

Esta tesis está dedicada con todo mi cariño a mi familia y amigos, quienes fueron mi apoyo incondicional en cada momento de este camino. Gracias por ser mi fortaleza y motivación constante; este logro también es suyo y espero que sea motivo de orgullo y alegría.

A mis padres, gracias por su inspiración, paciencia y ejemplo de perseverancia. Su confianza en mí me dio la determinación para culminar este proyecto.

Finalmente, a mi asesor, agradezco profundamente su guía, sabiduría y dedicación, que fueron fundamentales para el desarrollo y éxito de esta investigación

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, expreso mi más profundo agradecimiento a mi asesor de tesis, por su guía constante, por compartir generosamente su experiencia y conocimientos, así como por cada uno de sus valiosos comentarios y sugerencias que resultaron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, agradezco a los miembros del jurado de tesis, quienes con su dedicación, observaciones y recomendaciones contribuyeron de manera significativa a enriquecer y consolidar esta investigación.

Del mismo modo, manifiesto mi sincera gratitud a mi familia, amigos y seres queridos, cuyo apoyo incondicional, paciencia, amor y motivación me brindaron la fortaleza necesaria para perseverar y culminar esta meta.

## RESUMEN

En la localidad de San Miguel, provincia de La Mar (Ayacucho), la recurrencia de lluvias intensas incrementa el riesgo de inundaciones en los sectores adyacentes al río Ucumayo, representando una amenaza para viviendas, instituciones públicas y áreas agrícolas. El objetivo de esta investigación fue identificar las zonas vulnerables a inundaciones mediante la modelación hidrológica e hidráulica en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucumayo. Se aplicó un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y nivel explicativo, utilizando el programa HEC-HMS para la simulación de caudales máximos y HEC-RAS para el análisis hidráulico del cauce. El estudio se sustentó en series pluviométricas corregidas con la curva de doble masa, curvas IDF, hietogramas generados con el método de bloques alternos y modelos digitales de elevación. Los resultados muestran caudales pico de hasta 55.0 m<sup>3</sup>/s para un periodo de retorno de 500 años, con profundidades de inundación superiores a 1.8 m; y para un periodo de 70 años, un caudal de 34.6 m<sup>3</sup>/s que genera un área inundada de 114,890 m<sup>2</sup>, afectando viviendas, áreas agrícolas e infraestructura pública. En conclusión, la modelación permitió delimitar con precisión las zonas expuestas y aportar información clave para la gestión del riesgo, destacando la necesidad de implementar defensas ribereñas y medidas preventivas.

**Palabras Clave:** Modelación hidrológica, HEC-HMS, HEC-RAS, caudales máximos, vulnerabilidad, gestión del riesgo.

## ABSTRACT

In the locality of San Miguel, province of La Mar (Ayacucho), the recurrence of intense rainfall increases the risk of flooding in areas adjacent to the Ucusmayo River, posing a threat to housing, public institutions, and agricultural land. The objective of this research was to identify flood-prone areas through hydrological and hydraulic modeling in the section between the Canalpata neighborhood and the Ucusmayo Bridge. A quantitative, applied, and explanatory approach was used, employing the HEC-HMS software for peak flow simulation and HEC-RAS for hydraulic river analysis. The study was based on rainfall series corrected using the double mass curve, IDF curves, hyetographs generated with the alternating block method, and digital elevation models. The results indicate peak flows of up to 55.0 m<sup>3</sup>/s for a 500-year return period, with flood depths exceeding 1.8 m; and for a 70-year return period, a flow of 34.6 m<sup>3</sup>/s generating an inundated area of 114,890 m<sup>2</sup>, affecting housing, farmland, and public infrastructure. In conclusion, the integrated modeling approach enabled the accurate delineation of exposed areas and provided key information for risk management, highlighting the need for river defenses and preventive measures.

**Keywords:** Hydrological modeling, HEC-HMS, HEC-RAS, peak flows, vulnerability, risk management.

## ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN O CONFORMIDAD .....	2
DEDICATORIA .....	3
AGRADECIMIENTOS .....	4
RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6
ÍNDICE GENERAL .....	7
ÍNDICE DE TABLAS .....	10
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
CAPÍTULO I.....	15
INTRODUCCIÓN.....	15
CAPÍTULO II.....	19
MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. Antecedentes.....	19
2.1.1. A nivel internacional .....	19
2.1.2. A nivel nacional .....	19
2.2. Bases teóricas .....	21
2.2.1. Movimiento del agua .....	21
2.2.2. Cuenca hidrográfica .....	23
2.2.3. Características de una cuenca .....	27
2.2.4. Clasificación de cuencas .....	31
2.2.5. Precipitación.....	33
2.2.6. Prueba de consistencia y contrastación de hipótesis.....	36
2.2.7. Registros pluviométricos .....	37
2.2.8. Crecientes.....	44
2.2.9. Sistema de Información Geográfica en la hidrología .....	49

2.2.10. Concepto de modelo .....	49
2.2.11. Modelación hidrológica .....	51
2.2.12. Hydrognomon .....	52
2.2.13. HEC-HMS en el análisis hidrológico de inundaciones .....	53
2.2.14. HEC-RAS para inundaciones .....	54
2.2.15. Modelación hidráulica .....	54
2.2.16. Definiciones conceptuales.....	56
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>58</b>
<b>MATERIAL Y MÉTODOS .....</b>	<b>58</b>
3.1. Materiales, Equipos y Software.....	58
3.2. Diseño metodológico .....	59
3.3. Población de estudio.....	59
3.4. Procedimientos .....	60
3.5. Nivel y diseño de investigación .....	63
3.6. Tamaño de muestra.....	63
3.7. Variables.....	64
3.8. Técnicas de recolección de datos .....	64
3.9. Indicadores .....	64
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>66</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>66</b>
4.1. Regionalización hidrológica .....	66
4.1.1. Ubicación de la cuenca y área de estudio .....	66
4.1.2. Inventario de estaciones pluviométricas .....	67
4.1.3. Validación y corrección de datos pluviométricos.....	71
4.1.4. Complementación de datos faltantes.....	71
4.1.5. Corrección de datos .....	77
4.1.6. Cálculo de promedios anuales .....	81
4.1.7. Cuenca y red hídrica .....	83

4.1.8. Clasificación del orden de ríos (método Strahler) .....	85
4.1.9. Modelo digital de elevación .....	87
4.1.10. Interpolación espacial de la precipitación .....	89
4.2. Modelado hidrológico – caudales máximos (HEC – HMS) .....	92
4.2.1. Cálculo de precipitaciones máximas a diferentes periodos de retorno.....	93
4.2.2. Curva de intensidad, duración y frecuencia (IDF) .....	96
4.2.1. Parámetros de la cuenca para modelamiento .....	108
4.2.2. Número de Curva .....	110
4.2.3. Cálculo de caudal pico .....	116
4.3. Identificación de zonas vulnerables (HEC – RAS).....	122
4.4. Discusión de resultados .....	147
CAPÍTULO V.....	151
CONCLUSIONES .....	151
CAPÍTULO VI .....	152
RECOMENDACIONES .....	152
REFERENCIAS.....	153
LISTA DE ABREVIATURAS .....	157
GLOSARIO.....	158
ANEXOS.....	160

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación de la densidad de drenaje</i> .....	29
Tabla 2 <i>Periodos de retornos según el tipo de proyectos</i> .....	45
Tabla 3 <i>Valores del periodo de retorno</i> .....	46
Tabla 4 <i>Coeficiente de rugosidad</i> .....	47
Tabla 5 <i>Coeficiente de rugosidad</i> .....	48
Tabla 6 <i>Operacionalización de variables</i> .....	64
Tabla 7 <i>Longitud de datos de cada estación</i> .....	69
Tabla 8 <i>Coordenadas de estaciones meteorológicas</i> .....	70
Tabla 9 <i>Datos de precipitación de SENHAMI - totales de cada año en mm</i> .....	72
Tabla 10 <i>Pendientes de recta para complementación de datos en estación La Quinua</i> .....	73
Tabla 11 <i>Pendientes de recta para completar datos en estación Wayllapampa</i> .....	73
Tabla 12 <i>Datos pluviométricos completados</i> .....	75
Tabla 13 <i>Cálculo de factor de corrección - La Quinua</i> .....	78
Tabla 14 <i>Cálculo de factor de corrección - Wayllapampa</i> .....	79
Tabla 15 <i>Datos de estaciones corregidos</i> .....	80
Tabla 16 <i>Promedios anuales para datos corregidos</i> .....	82
Tabla 17 <i>Precipitaciones en la cuenca estimadas a partir de la regionalización</i> .....	92
Tabla 18 <i>Prueba de bondad de ajuste</i> .....	94
Tabla 19 <i>Resultados de distribución de Gamma aplicada a precipitaciones máximas en 24h</i> .....	95
Tabla 20 <i>Precipitaciones estimadas con distribución Gamma para diferentes periodos de retorno</i> .....	96
Tabla 21 <i>Precipitación en 24 horas (mm) - Dick y Peschke</i> .....	98
Tabla 22 <i>Intensidad de precipitación (mm/hr) para diferentes duraciones y periodos de retorno</i> .....	100

Tabla 23	<i>Análisis de varianza</i> .....	104
Tabla 24	<i>Resultados de análisis</i> .....	104
Tabla 25	<i>Análisis de regresión múltiple</i> .....	105
Tabla 26	<i>Coeficientes de precipitación para diferentes tiempos de retorno según el modelo de Dyck y Peschke</i> .....	106
Tabla 27	<i>Parámetros de la cuenca</i> .....	108
Tabla 28	<i>Valores de CN para usos de suelos en Grupo C</i> .....	112
Tabla 29	<i>Áreas de uso de suelos</i> .....	114
Tabla 30	<i>Número de curva para cada uso de suelo</i> .....	114
Tabla 31	<i>Caudales máximos de diseño (m<sup>3</sup>/s)</i> .....	119
Tabla 32	<i>Posibles áreas de inundación entre Barrio Canalpata y puente Ucusmayo</i>	146

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Mapa de ubicación del área influencia del proyecto de tesis</i> .....	18
Figura 2 <i>Ciclo hidrológico</i> .....	22
Figura 3 <i>Esquema del ciclo hidrológico</i> .....	23
Figura 4 <i>Divisoria de aguas</i> .....	25
Figura 5 <i>Río principal</i> .....	26
Figura 6 <i>Orden de los ríos de una cuenca</i> .....	28
Figura 7 <i>Relieve de una cuenca</i> .....	30
Figura 8 <i>Pendiente vs perfil de cauce</i> .....	31
Figura 9 <i>Cuencas por su desembocadura</i> .....	32
Figura 10 <i>Tipos de lluvia</i> .....	34
Figura 11 <i>Tipos de lluvia</i> .....	36
Figura 12 <i>Pluviograma</i> .....	37
Figura 13 <i>Curva masa</i> .....	38
Figura 14 <i>Hietograma</i> .....	39
Figura 15 <i>Curva IDF</i> .....	40
Figura 16 <i>Polígono de Thiessen</i> .....	42
Figura 17 <i>Polígono de Thiessen</i> .....	43
Figura 18 <i>Costos anuales para determinación de periodo de retorno</i> .....	44
Figura 19 <i>Orden correlativo del método procedimental</i> .....	63
Figura 20 <i>Mapa de ubicación de la cuenca</i> .....	66
Figura 21 <i>Mapa de cuenca y área de estudio</i> .....	67
Figura 22 <i>Mapa de cuenca y estaciones meteorológicas</i> .....	71
Figura 23 <i>Curva de masas para completar datos en estación La Quinoa</i> .....	73
Figura 24 <i>Curva de masas para complementación de datos en estación Wayllapampa</i> .....	74
Figura 25 <i>Evaluación por curva de doble masa - inicial</i> .....	77

Figura 26	<i>Evaluación por curva de doble masa - estaciones inconsistentes vs estaciones base</i> .....	78
Figura 27	<i>Corrección - La Quinoa</i> .....	79
Figura 28	<i>Corrección Wayllapampa</i> .....	80
Figura 29	<i>Evaluación por curva de doble masa - post corrección</i> .....	81
Figura 30	<i>Mapa de cuenca y red hídrica del rio Ucusmayo</i> .....	84
Figura 31	<i>Clasificación del orden del río</i> .....	86
Figura 32	<i>Modelo digital de elevación de la cuenca (DEM)</i> .....	88
Figura 33	<i>Mapa de interpolación espacial de la precipitación</i> .....	91
Figura 34	<i>Resultados obtenidos de regionalización</i> .....	93
Figura 35	<i>Resultados pluviométricos con distribución Gamma</i> .....	95
Figura 36	<i>Curva de intensidad - duración - frecuencia (IDF)</i> .....	103
Figura 37	<i>Representación del Lag Time en el hidrograma de escorrentía</i> .....	109
Figura 38	<i>Mapa de tipos de suelo en cuenca</i> .....	111
Figura 39	<i>Mapa de uso de suelos</i> .....	113
Figura 40	<i>Verificación de hietograma en HEC-HMS</i> .....	118
Figura 41	<i>Hietograma de simulación</i> .....	120
Figura 42	<i>Series de tiempo para simulación</i> .....	121
Figura 43	<i>Primer procesamiento con HEC – GEO RAS en ArcGis</i> .....	122
Figura 44	<i>Ingreso de geometría en HEC – RAS</i> .....	123
Figura 45	<i>Datos completos en HEC - RAS</i> .....	124
Figura 46	<i>Vista de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR-5 años)</i> .....	124
Figura 47	<i>Vista de Modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR-500 años)</i> .....	125
Figura 48	<i>Número de Manning para el modelamiento</i> .....	128
Figura 49	<i>Vista 1 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR-5 años)</i> .....	130
Figura 50	<i>Vista 2 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR-5 años)</i> .....	130
Figura 51	<i>Sección transversal 1 de simulación de inundación (TR=5 años)</i> .....	131

Figura 52	<i>Sección transversal 2 de simulación de inundación (TR=5 años)</i> .....	131
Figura 53	<i>Sección transversal 3 de simulación de inundación (TR=5 años)</i> .....	132
Figura 54	<i>Sección transversal 4 de simulación de inundación (TR=5 años)</i> .....	132
Figura 55	<i>Sección transversal 4 de simulación de inundación (TR=5 años)</i> .....	133
Figura 56	<i>Vista 1 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR=70 años)</i> .....	133
Figura 57	<i>Vista 2 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR=70 años)</i> .....	134
Figura 58	<i>Sección transversal 1 de simulación de inundación (TR=70 años)</i> .....	134
Figura 59	<i>Sección transversal 2 de simulación de inundación (TR=70 años)</i> .....	135
Figura 60	<i>Sección transversal 3 de simulación de inundación (TR=70 años)</i> .....	135
Figura 61	<i>Sección transversal 4 de simulación de inundación (TR=70 años)</i> .....	136
Figura 62	<i>Sección transversal 4 de simulación de inundación (TR=70 años)</i> .....	136
Figura 63	<i>Vista 1 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR=500 años)</i> .....	137
Figura 64	<i>Vista 2 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR=500 años)</i> .....	137
Figura 65	<i>Sección transversal 1 de simulación de inundación (TR=500 años)</i> .....	138
Figura 66	<i>Sección transversal 2 de simulación de inundación (TR=500 años)</i> .....	138
Figura 67	<i>Sección transversal 3 de simulación de inundación (TR=500 años)</i> .....	139
Figura 68	<i>Sección transversal 4 de simulación de inundación (TR=500 años)</i> .....	139
Figura 69	<i>Sección transversal 5 de simulación de inundación (TR=500 años)</i> .....	140
Figura 70	<i>Mapa de zonas vulnerables a inundaciones - TR 5 años</i> .....	141
Figura 71	<i>Mapa de zonas vulnerables a inundaciones - TR 500 años</i> .....	142
Figura 72	<i>Zonas vulnerables a inundaciones en área de estudio - TR 5 años</i> .....	143
Figura 73	<i>Zonas vulnerables a inundaciones en área de estudio - TR 70 años</i> .....	144
Figura 74	<i>Zonas vulnerables a inundaciones en área de Estudio - TR 500 años</i> .....	145

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Los cambios climáticos a nivel mundial, especialmente el calentamiento global, han ocasionado un incremento sostenido de la temperatura en la superficie terrestre y la atmósfera. Este fenómeno, asociado a la acumulación de gases de efecto invernadero, modifica el ciclo hidrológico y genera precipitaciones más intensas y frecuentes (IPCC, 2021). Como consecuencia, los caudales de los ríos tienden a incrementarse, ocasionando crecidas, desbordes e inundaciones que afectan de manera recurrente a comunidades asentadas en zonas aledañas.

En el Perú, las inundaciones representan uno de los desastres naturales más recurrentes y con mayores impactos socioeconómicos. Entre 2003 y 2023, alrededor del 40 % de emergencias registradas se originaron por este fenómeno, afectando principalmente la costa norte y la sierra sur (CENEPRED, 2023). Eventos como el Fenómeno El Niño Costero 2017 demostraron la alta vulnerabilidad de la infraestructura y de los sistemas productivos frente a lluvias extremas. A nivel regional, Ayacucho presenta condiciones topográficas y climáticas que favorecen la ocurrencia de avenidas súbitas y procesos de erosión (ANA, 2022).

En la provincia de La Mar, diversos centros poblados han sufrido daños recurrentes en viviendas, infraestructura vial, instituciones educativas y áreas agrícolas debido a desbordes de ríos. En particular, la localidad de San Miguel enfrenta un riesgo creciente por el comportamiento del río Ucusmayo. Durante la temporada de lluvias, en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucusmayo (1.14 km de longitud), se producen crecidas que generan inundaciones, erosión y acumulación de sedimentos, con pérdidas materiales y productivas significativas (Medina y Blas, 2021; AgroPerú, 2025).

A pesar de la magnitud del problema, en San Miguel no se han desarrollado estudios específicos sobre la vulnerabilidad a inundaciones en el río Ucusmayo. Esta carencia limita la capacidad de autoridades y pobladores para implementar medidas preventivas y proyectos de mitigación. Ante ello, resulta necesario generar información técnica que permita identificar las zonas de mayor riesgo y sustente futuras intervenciones de gestión del territorio y protección de la población.

En este contexto, la presente investigación propone aplicar modelamiento hidrológico e hidráulico mediante los programas HEC-HMS y HEC-RAS, en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucusmayo. Esta metodología permitió estimar caudales para distintos periodos de retorno, analizar el comportamiento hidráulico

del cauce e identificar áreas vulnerables a inundaciones. Los resultados construyeron una base técnica para proyectos de infraestructura, planes de ordenamiento territorial y estrategias de gestión del riesgo en la provincia de La Mar.

### **Problema general**

¿La modelación hidrológica e hidráulica del río Ucusmayo en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y puente Ucusmayo de la localidad de San Miguel, permite Identificar las zonas vulnerables a inundaciones?

### **Problemas específicas**

- ❖ ¿Cómo realizar la caracterización pluviométrica, de la cuenca del río Ucusmayo?
- ❖ ¿Cuáles serán los valores de caudales máximos estimados mediante el modelado hidrológico, utilizando el programa HEC-HMS?
- ❖ ¿Cómo identificar las zonas vulnerables a inundaciones en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucusmayo en la localidad de San Miguel, utilizando el programa HEC-RAS?

### **Objetivo general**

Identificar las zonas vulnerables a inundaciones a través de la modelación hidrológica e hidráulica del río Ucusmayo en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y puente Ucusmayo de la localidad de San Miguel.

#### **b. Objetivos específicos**

- ❖ Realizar la regionalización hidrológica de la cuenca del río Ucusmayo con fines de caracterización pluviométrica
- ❖ Estimar los caudales máximos a través del modelado hidrológico utilizando el programa HEC-HMS.
- ❖ Identificar las zonas vulnerables a inundaciones en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucusmayo en la localidad de San Miguel, utilizando el programa HEC-RAS.

### **Hipótesis general**

La modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y puente Ucumayo de la localidad de San Miguel, permite Identificar las zonas vulnerables a inundaciones.

### **Hipótesis específica**

1. La regionalización hidrológica de la cuenca del río Ucumayo permitirá realizar la caracterización pluviométrica.
2. El modelado hidrológico utilizando el programa HEC-HMS, permitirá determinar los valores de caudales máximos estimados.
3. El programa HEC-RAS, permitirá identificar las zonas vulnerables a inundaciones en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucumayo en la localidad de San Miguel.

### **Ubicación política**

Políticamente el área de estudio se encuentra ubicado en:

**Departamento:** Ayacucho

**Provincia:** La Mar

**Distrito:** San Miguel

**Zona:** Rural

**Región:** Sierra

### **Ubicación geográfica**

La ubicación geográfica del área de estudio está ubicada en las coordenadas UTM WGS 84 y la zona 18 S – UTM

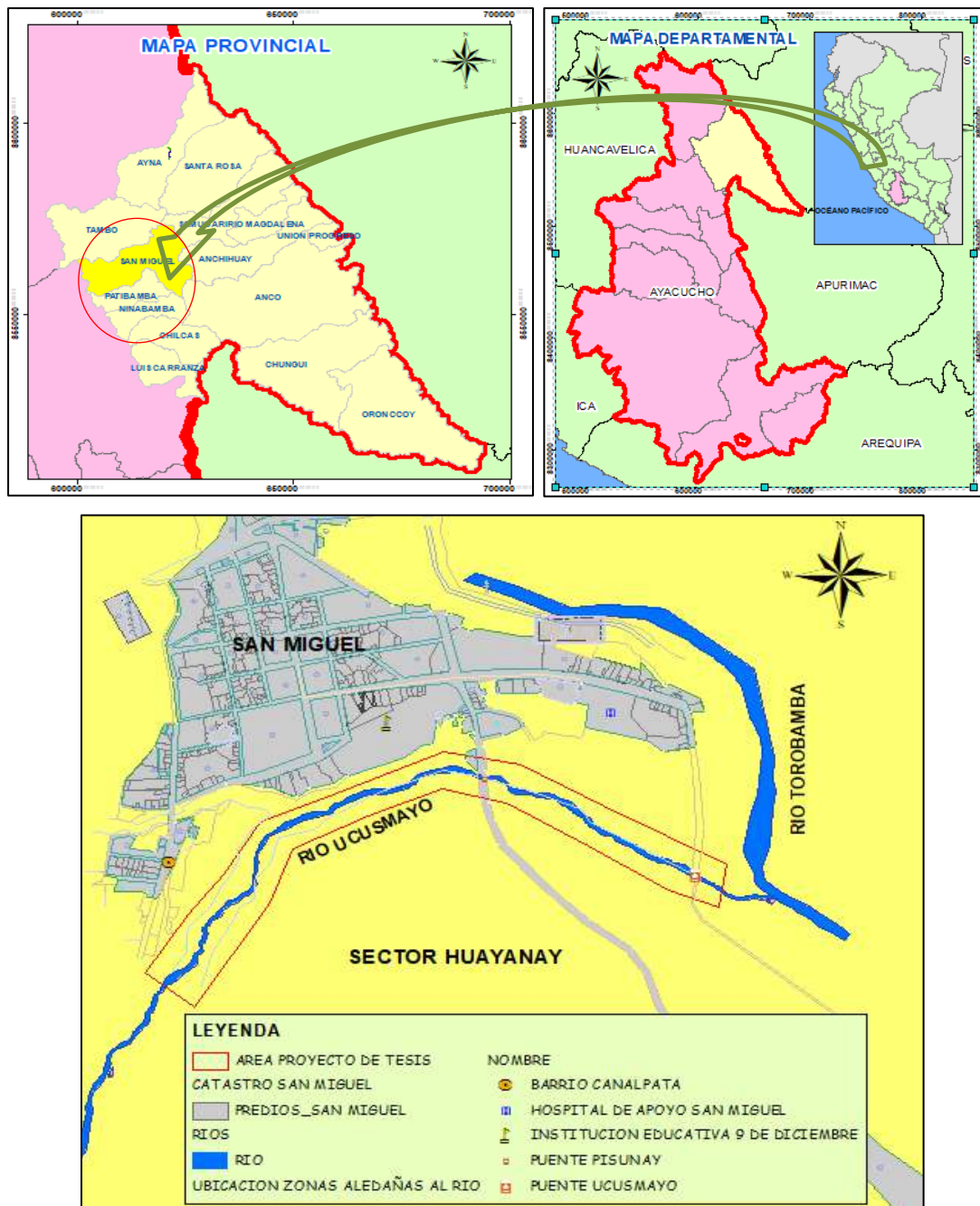
**Este:** 610497.75m

**Norte:** 8561229.35m

**Altitud:** 2640 m.s.n.m.

**Figura 1**

*Mapa de ubicación del área influencia del proyecto de tesis*



*Nota.* Se presenta la ubicación de la localidad de San Miguel, en el departamento de Ayacucho.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes**

##### **2.1.1. A nivel internacional**

Dada la magnitud del problema de inundaciones a nivel mundial se han venido realizando estudios similares tanto a nivel internacional, nacional.

Vera (2015), en Colombia, realizó un análisis hidrológico de la cuenca alta del río Bogotá, en el sector de Villapinzón, utilizando herramientas computacionales como HEC-HMS para la simulación de caudales, y HEC-RAS e Íber para modelaciones hidráulicas unidimensionales y bidimensionales. Los resultados permitieron identificar los sectores más propensos a inundaciones dentro del área urbana y rural colindante al cauce. Se determinó que, ante eventos de creciente con periodos de retorno de 25 y 50 años, los caudales superaban los 120 m<sup>3</sup>/s, generando anegamientos en más de 15 hectáreas, afectando directamente a unas 80 viviendas y tramos críticos de la vía principal. La aplicación de estos resultados fue clave para que las autoridades locales formularan estrategias de mitigación, tales como el rediseño de defensas ribereñas y la delimitación de zonas de uso restringido en áreas vulnerables. Este estudio sirvió además como base técnica para orientar futuras obras hidráulicas y planes de ordenamiento territorial en el municipio.

Aguilar (2010), en Ecuador realizó un estudio titulado “Modelación hidrológica de crecidas en la cuenca del río Machángara en la ciudad de Quito”. Pronosticando que, en un periodo de 50, 100 y 200 años tendrían una alta probabilidad de ser afectados por la crecida del río en un por efecto de la intensidad de lluvias. Así mismo determinó que el régimen del flujo del río en el tramo simulado muestra que debido a ciertas caídas de agua considerables denominados saltos hidráulicos, su flujo variaría de subcrítico a supercrítico, por ende, existe la necesidad de usar el tipo de modelación mixta, la cual se encuentra presente en el programa HEC -RAS como una alternativa útil para reducir y mejorar el desarrollo dentro del proceso de simulación.

##### **2.1.2. A nivel nacional**

Santillán (2022), en Piura, desarrolló la investigación titulada “Modelación hidrológica e hidráulica del Río Chalaco, para el diseño de Puente Chalaco, cuenca Medio Alto Piura”. El estudio tuvo como objetivo obtener el caudal de avenida máxima mediante la modelación hidrológica de la cuenca del río Chalaco y su posterior

modelamiento hidráulico unidimensional en el tramo del puente. Se caracterizó fisiográficamente la cuenca a través de parámetros geomorfológicos y el Número de Curva. Se analizaron datos de precipitación máxima de 24 horas de la estación Chalaco con el método del Water Resources Council y el análisis de frecuencia, donde la distribución de Gumbel mostró mejor ajuste. Se estimó la curva IDF, el hietograma de diseño y se aplicó el método de hidrograma sintético de Snyder, obteniendo un caudal de diseño para un periodo de retorno de 175 años. Con el modelo hidráulico en HEC-RAS se estimaron dimensiones del cauce y del nuevo puente, considerando datos topográficos aguas arriba y abajo. Se obtuvo un caudal máximo de 621.70 m<sup>3</sup>/s, un NAME de 223.92 m.s.n.m., tirante de 2.18 m, galibo de 2.5 m y luz hidráulica de 70 m.

Flores (2023), en Tacna, realizó la investigación titulada “Modelamiento hidráulico para determinar el predimensionamiento de diques de encauzamiento en la Quebrada del Diablo, Región Tacna”. El trabajo tuvo como fin aportar al diseño futuro de obras para mitigar los efectos de huaicos y proteger las viviendas ubicadas en la parte baja de la quebrada. Se consideraron estudios topográficos, puntos críticos y pendientes, ya que el cauce presenta superficie irregular por la erosión y material de arrastre. Se realizaron análisis hidrológicos para determinar caudales con periodos de retorno entre 5 y 1000 años, obteniéndose caudales pico entre 17.97 y 121.98 m<sup>3</sup>/s, y volúmenes de agua entre 87,901.08 m<sup>3</sup> y 653,215.80 m<sup>3</sup>. Se identificaron dos sitios de intervención para ubicar posibles diques y, tras la modelación hidráulica, se plantearon dos propuestas: una presa de retención de concreto-gravedad de 25 m de altura y otra de tierra y enrocado de 24 m.

Silvera y Mendoza (2022), en Apurímac realizaron una investigación denominada “Determinación de superficie de inundación del río Chumbao en el distrito de San Jerónimo, mediante el modelo numérico HEC-RAS.”. En el trabajo describe que el distrito de San Jerónimo presenta un peligro de inundaciones debido a la cuenca del río Chumbao, por tal motivo, surge la necesidad de determinar las superficies de inundación en sus eventos de máximas avenidas. La investigación tuvo como objetivo determinar la superficie de inundación del río Chumbao en el distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas, departamento de Apurímac; mediante la recolección de datos en campo como la topografía, la caracterización del área delimitada dentro de la cuenca, la determinación del caudal máximo para diferentes periodos de retorno (modelación hidrológica) mediante el programa HEC-HMS a partir de la precipitación máxima 24 horas, obtenidas de diferentes estaciones meteorológicas y finalmente la

modelación hidráulica bidimensional con el programa HEC-RAS. El área de estudio determinada es de 172.39 km<sup>2</sup>, siendo su caudal de 216 m<sup>3</sup>/s para un período de retorno de 500 años, una superficie de inundación total de 31 Ha, con alturas máximas de inundación de hasta 3.87 m. Finalmente la determinación de la superficie de inundación permitirá que las autoridades locales tomen medidas de prevención ante desbordamiento e inundación en el distrito de San Jerónimo.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Movimiento del agua**

Se sabe que el agua puede presentarse en diferentes estados de materia, uno de los tipos de presentación es la de vapor en la atmósfera el cual se puede condensar en las nubes, este evento propicia las precipitaciones las cuales pueden ser nieve, lluvia o granizadas, parte de las precipitaciones se evaporan previamente al llegar a la superficie y la precipitación que no se evapora cae al suelo por acción de la gravedad. Del porcentaje que logra caer en la superficie llega a ser interceptada por la vegetación y por otras superficies para finalmente ser evaporadas nuevamente, el porcentaje que no es interceptado puede llegar a tener un contacto directo con el suelo o puede llegar a incrementar los volúmenes de agua libre que se encuentre en la superficie. Parte del porcentaje que llega a tener contacto directo con el suelo puede tener efecto directo sobre las redes hidrográficas de la zona en forma de escorrentía superficial o puede presentar el efecto de infiltración y de esta forma abastecer las reservas de las capas acuíferas. La energía que se requiere para iniciar el ciclo hidrológico se genera a partir del sol, esta energía genera que el agua localizada en zonas libres se evapore. De la misma forma el líquido que no se encuentra en las zonas no saturadas del suelo llega a evaporarse por completo o puede ser absorbidas por las plantas y estas a su vez pueden devolver el líquido en forma de vapor a la atmósfera mediante formas de transpiración. Dichos efectos se catalogan como evapotranspiración. En relación al agua infiltrada en áreas profundas y que por consiguiente abastece a las zonas acuíferas, puede pasar a abastecer los flujos de los ríos o regresar directamente a los mares por efecto de la percolación para por ende reiniciar el ciclo (Vélez, 2000).

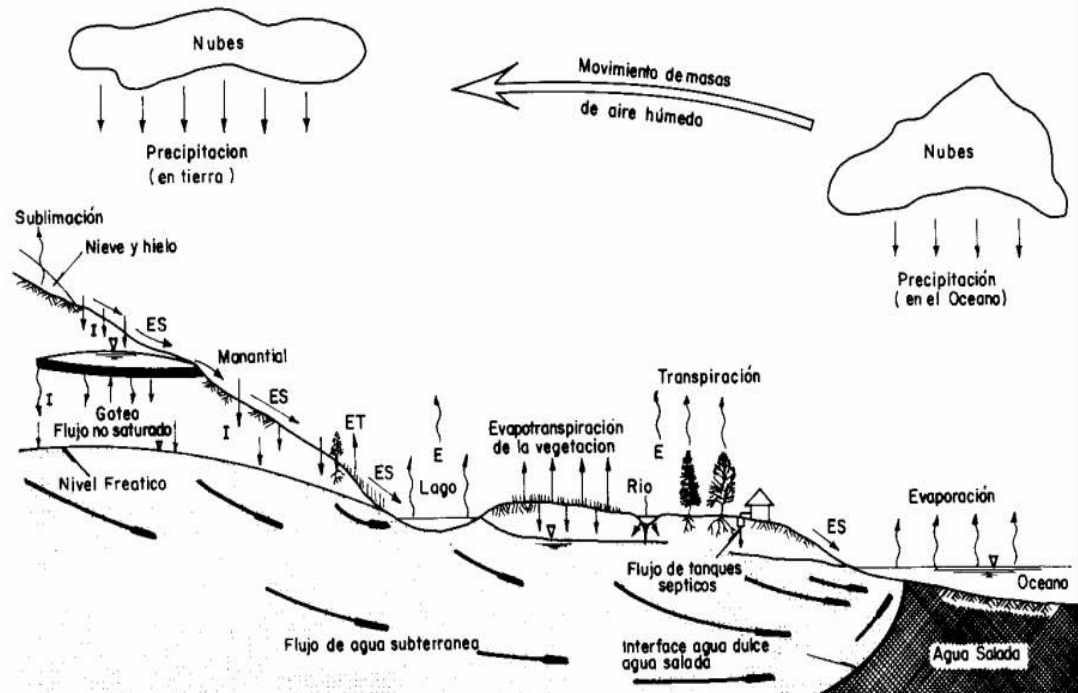
De las energías que generan el ciclo hidrológico son principalmente la energía calorífica ocasionada por el sol y la energía gravitacional, a partir del ciclo hidrológico se pueden identificar las siguientes fases:

- Precipitación (P)
- Evapotranspiración (ET)

- Escorrentía superficial (ESD)
- Infiltración (I)

**Figura 2**

*Ciclo hidrológico*



*Nota.* Se presenta el ciclo del agua desde la precipitación, sublimación, flujo, dirección, evaporación y movimiento de masas. Autor: Vélez (2000).

- **Subsistema atmosférico**

Este subsistema es abastecido por evaporaciones, este vapor de agua puede ser desplazado a partir del proceso de circulación atmosférica, en las cuales si se presenta un entorno atmosférico adecuado este vapor podrá abandonar su estado para pasar a formar parte de las precipitaciones.

- **Subsistema del agua superficial**

Este subsistema se considera como el inicio, debido a que una vez el agua interceptada sea eliminada, la precipitación que queda se transformará en escurrimiento sobre el terreno, por lo cual esa precipitación restante llegará a la parte del drenaje del área donde se suscita la precipitación.

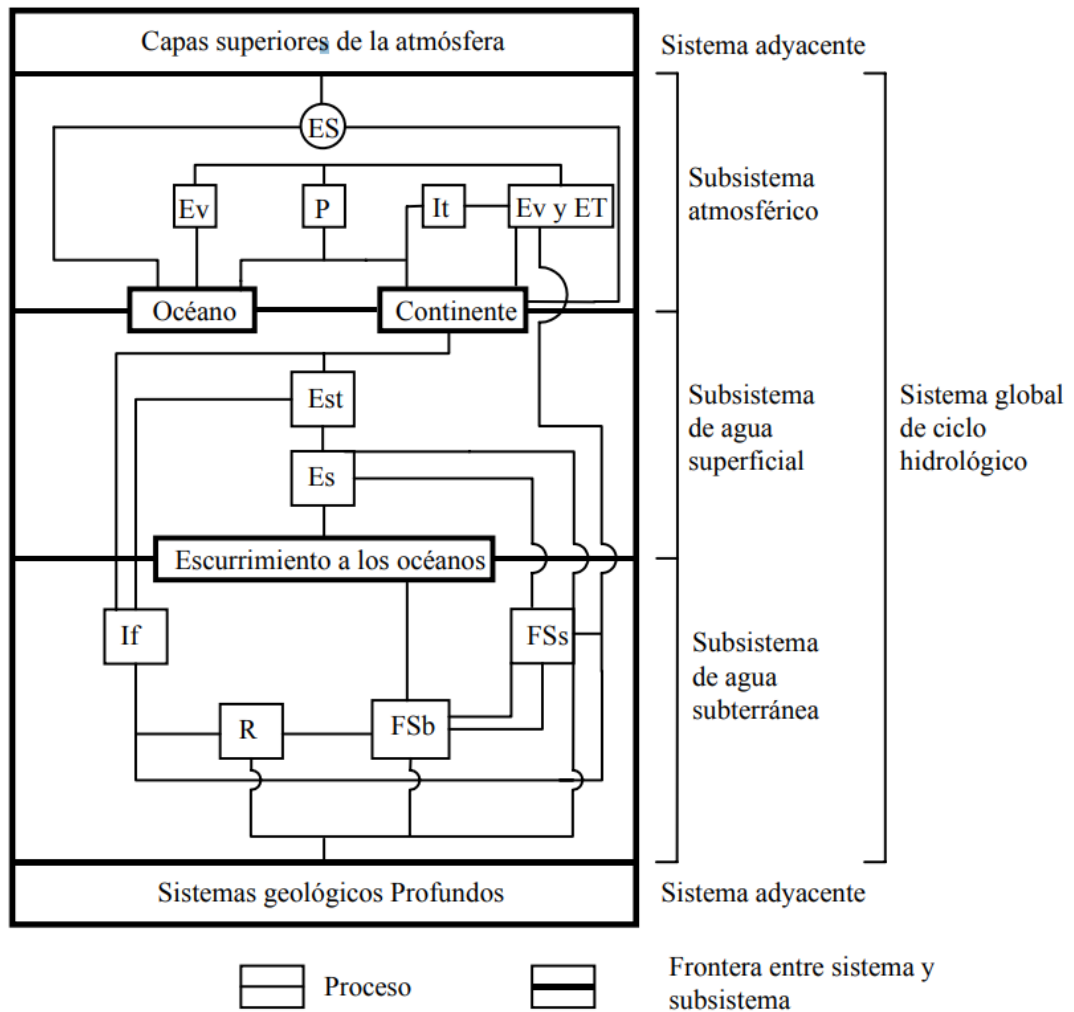
- **Subsistema del agua subterránea**

Este tipo se genera a partir de la precipitación infiltrada, se sabe que a mayor profundidad el agua infiltrada se ve afectada por el fenómeno denominado percolación,

llegando así a la zona de almacenamiento de aguas subterráneas. Dentro de este subsistema se puede identificar 2 zonas los cuales se clasifican como flujo subterráneo y flujo superficial. Para el flujo subterráneo se sabe que abarca grandes superficies y funciona como una salida de agua hacia otros sistemas. Para el flujo superficial se sabe que generalmente tienen un abarque local, se puede tomar en cuenta a este sistema como una salida mediante los procesos de evapotranspiración.

**Figura 3**

*Esquema del ciclo hidrológico*



*Nota.* Se presenta el esquema del ciclo hidrológico incluyendo los sistemas globales del ciclo Vélez (2000).

### 2.2.2. Cuenca hidrográfica

Se puede definir como una cuenca al área que es definida a partir de características topográficas en la cual se puede drenar a partir de un curso de agua o

un sistema complejo de cursos de agua que confluyen en un mismo punto de salida para que todos los caudales denominados efluentes sean descargados. Una cuenca hidrográfica puede ser aplicada como una unidad planificadora en relación a los recursos hídricos que posea. Para una cuenca se tiene que tener en consideración que estas también pueden estar compuestas por sub cuencas de menor tamaño que descargan en un cauce principal de una cuenca a estos ríos que descargan se les denominan ríos tributantes (Vásconez et al., 2019).

- **Función ambiental**

Este tipo de funciones se pueden reconocer a partir de las acciones:

- Sumideros de CO<sub>2</sub>.
- Recarga hídrica.
- Diversidad de suelos.
- Protección de biodiversidades.

- **Función ecológica**

Este tipo de funciones se pueden reconocer a partir de las acciones:

- Hábitats para la fauna existente en la cuenca.
- Ecosistemas adecuados para la flora.
- Parámetros para la calidad del agua tanto física y química.

- **Función hidrológica**

Este tipo de funciones se pueden reconocer a partir de las acciones:

- Drenar las aguas precipitadas.
- Abastecer las fuentes de aguas subterráneas.
- Abastecer las fuentes de aguas superficiales.

- **Función socioeconómica**

Este tipo de funciones se pueden reconocer a partir de las acciones:

- Abastecimiento de recursos renovables.
- Abastecimiento de recursos no renovables.
- Zonas de expansión social.
- Zonas de desarrollo cultural.

- **Elementos de una cuenca**

Para la caracterización de una cuenca se tienen que tener en cuenta los siguientes elementos:

- **Divisoria de aguas**

Se denomina a divisoria a la línea imaginaria que cumple la función de limitante de vertientes hidrográficas contiguas estas se ubican en partes altas de las montañas que contienen a todas las vertientes que en una precipitación drenan en agua en un solo punto.

**Figura 4**

*Divisoria de aguas*



*Nota.* Se presentan las partes principales de una cuenca. Autor: Vásconez et al. (2019)

- **Río principal**

Este elemento de la cuenca se define como el río con mayor longitud con una conducción de caudal alta para los tramos alto, medio y bajo. Este elemento presenta las siguientes características:

- Curso superior: Característicamente esta parte del curso posee un volumen de caudal bajo provenientes de manantiales, deshielo o aforamientos. La calidad del agua para este tramo del cauce suele ser la más óptima debido a que en su entorno no se encuentran factores contaminantes. Con relación a la velocidad del flujo esta tienden a ser altas por cauce de los relieves montañosos con pendientes fuertes y por el mismo motivo el poder erosivo del flujo es alto.
- Curso medio: En este tramo del cauce se presentan caudales constantes en todo el año hidrológico por lo cual se puede ejecutar obras hidráulicas en la zona para el aprovechamiento hídrico. Para este tramo del cauce la calidad del agua es cuestionable debido a que en esta zona se encuentran

establecimientos urbanos es por ello que en el agua se encontraron evidencia de pesticidas y herbicidas.

- Curso inferior: Para este tramo del cauce se presentan secciones de cauce anchos y profundos, los valores de caudales son muy altos con velocidades bajas lo cual generan efectos de sedimentación en el cauce, las estructuras planteadas en este tramo del cauce son más de encausamiento debido a que en esta zona se presentan eventos inundaciones.

### Figura 5

#### Río principal



*Nota.* Se presentan las principales partes de un río, desde su nacimiento hasta su desembocadura, obtenido de Vásconez et al. (2019).

#### • Afluente

Vásconez et al. (2019) definen a un afluente a los ríos secundarios que componen una cuenca hidrográfica los cuales tributan al río principal, este tipo de ríos presentan la problemática de contaminación debido a que estos cuerpos de agua se encuentran en la zona agrícola y ganadera, según los autores estos ríos se pueden clasificar a partir de su incidencia temporal de la siguiente manera:

- Perennes: Son ríos que tienen agua todo el año, mantenidos por las aguas subterráneas en épocas de sequía.
- Intermittentes: Ríos que se generan en temporadas lluviosas.
- Efímeros: Generados por precipitaciones inmediatas formados por escurrimientos superficiales.

### **2.2.3. Características de una cuenca**

A partir de la identificación de las características de una cuenca se pueden determinar algunos comportamientos de la cuenca frente a eventos hidrológicos y con ello poder plantear medidas de reacción más óptimas.

- **Área de drenaje**

Se define como área de drenaje a la proyección horizontal que la limita por la línea divisoria de aguas. La determinación del valor del área de drenaje se puede realizar a partir de la aplicación de programas SIG las cuales facilitan el proceso manual de la determinación del valor, esta misma metodología se aplica con el uso de imágenes satelitales o con información levantada mediante metodologías de fotogrametría ejecutadas en la cuenca de interés. En el Perú las imágenes para la delimitación de cuencas se pueden obtener de las cartas nacionales las cuales las brinda los sistemas de información estatales.

- **Forma**

Para una cuenca hidrológica la forma está directamente influenciada por los factores geológicos presentes en la zona de interés y afecta directamente al valor del tiempo de concentración de la cuenca, el tiempo de concentración se define como el intervalo de tiempo en que una gota de lluvia demora en recorrer toda la cuenca hasta el punto de desfogue de la cuenca.

Los valores del factor de forma afecta directamente a los valores del índice de Gravelius, el índice se basa en la relación que se presenta entre el perímetro y el área de la cuenca, el cual se relaciona con cuán circular es la cuenca de interés con lo cual se puede conocer uno de los indicadores de las tendencias de inundaciones, otro de los índices que se relaciona con el factor de forma es el de Horton el cual identifica que tan cuadrada es la cuenca. Finalmente se puede decir que el valor de forma de una cuenca tiene una alta influencia en la reacción de la cuenca frente a una precipitación, dicho esto si la cuenca presenta una forma muy circular las zonas limítrofes de la cuenca se encuentran más cerca al cauce principal a diferencia de una cuenca con forma ovalada, esto pues se puede transformar en menos periodo de tiempo en que la precipitación llegue a el cauce principal y con ello hay una mayor probabilidad a inundaciones, pero este factor no es determinante ya que también se tiene que tener en cuenta las características de suelo y los valores del tiempo de concentración.

- **Sistema de drenaje**

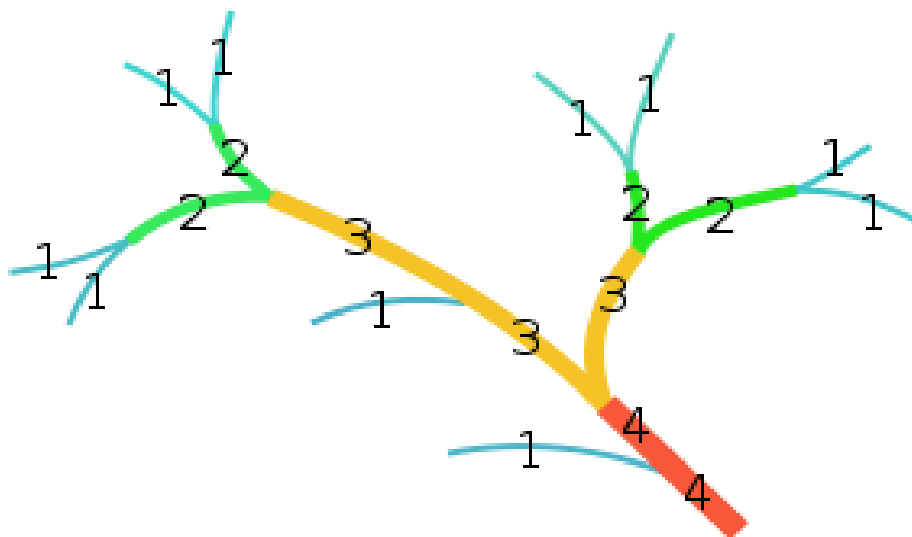
Dentro de la caracterización del sistema de drenaje de una cuenca se tiene que tener en cuenta:

- **Grado de ramificación**

Se define como grado de ramificación a las nacientes o ríos que no cuentan con otro río tributarios, a dichos ríos se los clasifica como ríos de orden 1, para los ríos en los cuales tributan dos ríos de orden 1 se les denomina ríos de orden 2 y así para todos los ríos que conformen la cuenca, los patrones que formen los ríos y sus tributarios depende netamente de las condiciones topográficas, clima, geología y tipos de suelo que existan en la cuenca a analizar.

**Figura 6**

*Orden de los ríos de una cuenca*



*Nota.* Se presentan los diferentes órdenes de los ríos. Autor: Vásconez et al. (2019).

- **Densidad de drenaje**

La densidad de drenaje se plantea como la relación que existe entre la longitud de los cursos de agua con el área total. Este valor representa la longitud por unidad de superficies. Estos valores dependen principalmente de la permeabilidad del suelo, clima y vegetación que presenta la cuenca.

$$Dd = \frac{\sum L}{A}$$

El cual se puede clasificar a partir del resultado los siguientes valores:

**Tabla 1**

*Clasificación de la densidad de drenaje*

<b>Tipo de cuenca</b>	<b>Valor</b>
Drenaje pobre	$Dd < 0.5 \text{ km/km}^2$
Drenaje regular	$0.5 < Dd < 1.5 \text{ km/km}^2$
Drenaje bueno	$1.5 < Dd < 2.5 \text{ km/km}^2$
Drenaje muy bueno	$2.5 < Dd < 3.5 \text{ km/km}^2$
Excepcionalmente bien drenadas	$Dd > 3.5 \text{ km/km}^2$

*Nota.* Se presentan los tipos de drenaje de cuencas. Autor: Vásconez et al. (2019).

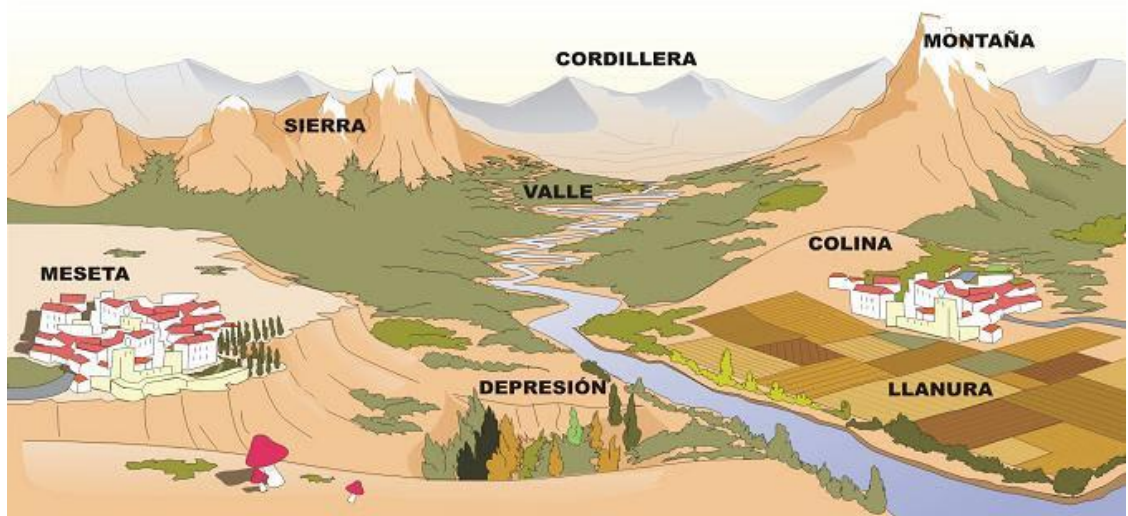
- **Relieve**

Se define a relieve de una cuenca a la formación morfológica la cual se formó en un largo periodo de tiempo por acciones de compresión y fuerzas externas que moldean el terreno en la cual se forma la cuenca. Dentro del relieve se puede considerar las siguientes formas:

- Llanura: Zona de amplia extensión con poca presencia de ondulaciones generalmente ubicadas a los 500 msnm, estas zonas generalmente se encuentran rodeadas de montañas o colinas de manera parcial. Esta zona es característicamente ocupada por asentamientos humanos ya que en ellas se pueden desarrollar actividades agrícolas y agropecuarias.
- Depresión: Este tipo de formación se caracteriza por encontrarse a una altura menor que las zonas circundantes.
- Colina: Acumulación de terreno característicamente con menor altura que los 300 metros, su formación obedece a la presencia de fallas geológicas o accidentes de terreno.
- Valle: Es una formación tipo llanura que se limita a partir de cadenas montañosas por lo general contiene ríos dentro de su parea, característicamente usados para actividades agrícolas y ganaderas.
- Montaña: Acumulación de terreno por lo general supera a los 300 m en comparación con las colinas.
- Cordillera: Agrupación de montañas plegadas unas con otras.

## Figura 7

### Relieve de una cuenca



*Nota.* Se observa los diferentes relieves de una cuenca. Autor: Vásconez et al. (2019).

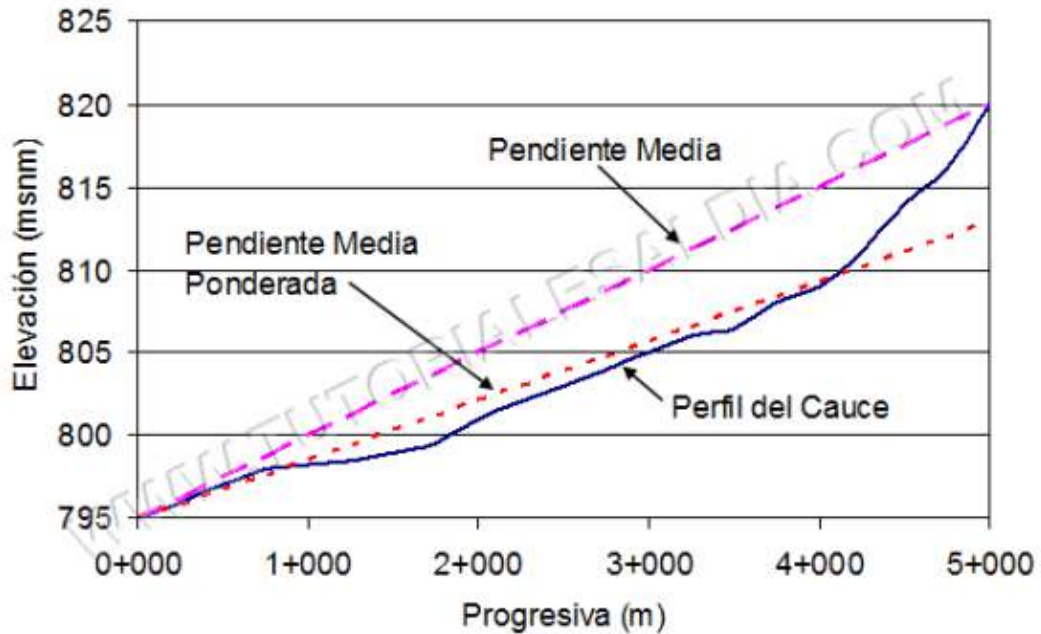
- **Pendiente**

Esta es una característica determinante para la respuesta de una cuenca frente a una precipitación, debido a que dicha característica es determinante para el escurrimiento ya que a una mayor pendiente les corresponde una mayor velocidad a los cauces y por ello un menor tiempo de concentración. Para el cálculo de la pendiente se pueden aplicar cualquiera de los siguientes métodos:

- Desnivel entre extremos de cauce: Se calcula a partir de la diferencia entre la altura del inicio y del final del cauce entre la longitud total del mismo.
- Pendiente promedio: Se determina a partir del trazo de una línea recta que compense las áreas superiores e inferiores del perfil del cauce.
- Pendiente 15-85: Se determina con la misma metodología de la compensación, pero para este método se descartan el 15% de las pendientes iniciales y finales del cauce debido a que en el inicio poseerá una pendiente alta y por el final una pendiente muy plana.

**Figura 8**

*Pendiente vs perfil de cauce*



*Nota.* Se presentará un corte transversal a la pendiente de la cuenca vs el perfil de cauce. Autor: Vásconez et al. (2019).

- **Tipo de suelo**

La caracterización del tipo de uso de suelo se ve directamente relacionado con las cantidades de agua que se puede infiltrar o verse afectado por la percolación, adicionalmente a ello se tiene también que los usos de suelo afectan directamente a la calidad del agua que recorra por la cuenca, también se ve directamente relacionado con cada uno de los procesos del ciclo hidrológico. Dependiendo de si las características de suelo son urbanas o de vegetación pueden afectar directamente al proceso de infiltración o intercepción, por otro lado, si se tiene una cuenca con un uso agrícola esto puede generar una mayor evapotranspiración, adicionalmente a ello si la cuenca es una cuenca urbana esto podría tener efectos frente a la reacción ante eventos naturales ya que una evacuación sería más complicada que al tener una cuenca catalogada como área de reserva natural.

#### **2.2.4. Clasificación de cuencas**

La clasificación de las cuencas se puede realizar a partir de los parámetros geomorfológicos que presente, con ello se puede clasificar de las siguientes maneras:

- **Por su tamaño.** Por el área superficial de la cuenca se pueden clasificar de las siguientes formas:
  - Cuenca muy grande: Contiene una superficie mayor a los 5000 km<sup>2</sup>.
  - Cuenca grande: Cuencas con una superficie entre el rango de 2500 a 5000 km<sup>2</sup>.
  - Cuenca intermedia grande: Cuencas con una superficie entre el rango de 500 a 2500 km<sup>2</sup>.
  - Cuenca intermedia: Cuencas con una superficie entre el rango de 250 a 500 km<sup>2</sup>.
  - Cuenca pequeña: Cuencas con una superficie entre el rango de 25 a 250 km<sup>2</sup>.
  - Cuenca muy pequeña: Cuencas con una superficie entre el rango menor a 25 km<sup>2</sup>.
- **Por la ubicación de la desembocadura.** A partir de la ubicación de si la desembocadura de la cuenca es al océano o hacia otros cuerpos de agua, se puede clasificar como:
  - Cuenca endorreica: Cuencas con punto de salida se encuentra dentro de la misma cuenca, una de las posibilidades puede ser un lago o una laguna.
  - Cuenca exorreica: El punto de salida de la cuenca se encuentra en un río que finalmente desemboca en el océano.
  - Cuenca arréica: Es aquella cuenca cuyo punto de desembocadura no desemboca en cuerpos de agua, sino que se filtra al subsuelo o evapora.

### Figura 9

*Cuencas por su desembocadura*



*Nota.* Se presentan tipos de cuenca por su desembocadura. Autor: Vásconez et al. (2019).

- **Por su uso.** Si bien las cuencas no solo se usan para un solo fin, sino que se presentan como una serie de usos, estas se pueden agrupar de acuerdo al uso

principal que se le asigne o en el cual base su aprovechamiento, de las cuales se puede clasificar como:

- Abastecimiento de agua potable
- Agua para regadíos
- Aguas para navegación

### **2.2.5. Precipitación**

Se plantea como lluvia a las precipitaciones de partículas líquidas de agua con un diámetro mayor de 0.5 mm o de gotas menores, pero con distribuciones dispersas. Los eventos de lluvia se generan a partir de 3 factores como la presión, temperatura y radiación solar.

#### **• Origen de las precipitaciones**

A partir del proceso en que el aire asciende se puede clasificar a las precipitaciones como:

- Lluvias convectivas: Formado a partir de la ascendencia del aire calentado en el lugar de la precipitación, este tipo de lluvias se dan en zonas con gran insolación y alta humedad.
- Lluvias orográficas: Se genera a partir de la acción de vientos húmedos en zonas con relieves montañosos.
- Lluvias frontales y ciclónicas: Generadas por acción de frentes fríos, calientes y ocluidos.

Generalmente las precipitaciones que se generan en la realidad no son exclusivas de un solo tipo, sino que en ocasiones se genera por la combinación de las causas, modificando así los tiempos de duración e intensidad.

**Figura 10**

*Tipos de lluvia*



*Nota.* Se presentan los tipos de llluvias. Gutiérrez (2014).

- **Análisis y complemento de información**

En ocasiones es necesario estimar llluvias puntuales en zonas cercanas a las estaciones meteorológicas, esto pues genera la necesidad de completar valores registrados o calcular la lluvia representativa en una zona de interés. Comúnmente en trabajos de hidrología uno de los factores a emplear más recurrentes son las informaciones de llluvias y como estas se trabajan en series continuas, se deben completar la información no recolectada, las cuales se pueden determinar a partir de las siguientes metodologías:

- Promedio aritmético: Esta metodología se sustenta a partir de la media de valores que pertenecen a 2 o más estaciones cercanas los cuales se denominan como índices. La consideración a tomar en cuenta es que la variación de los valores no debe superar al 10% de la precipitación normal de la estación que se requiere completar.
- Proporción normal: Esta metodología se basa en ponderar los valores letrados para en estaciones cercanas proporcionadas con el valor de lluvia en un año determinado en la estación de interés, esta expresión se puede traducir en:

$$P_x = \frac{1}{3} \left[ \frac{N_x}{N_A} P_A + \frac{N_x}{N_B} P_B + \frac{N_x}{N_C} P_C \right]$$

Del cual se sabe:

$P_x$  = Dato a estimar

$NA, NB, NC$  = Precipitación anual normal de estaciones base

$PA, PB, PC$  = Precipitación de las estaciones base en el periodo de interés

$N_x$  = Precipitación anual normal para la estación de interés.

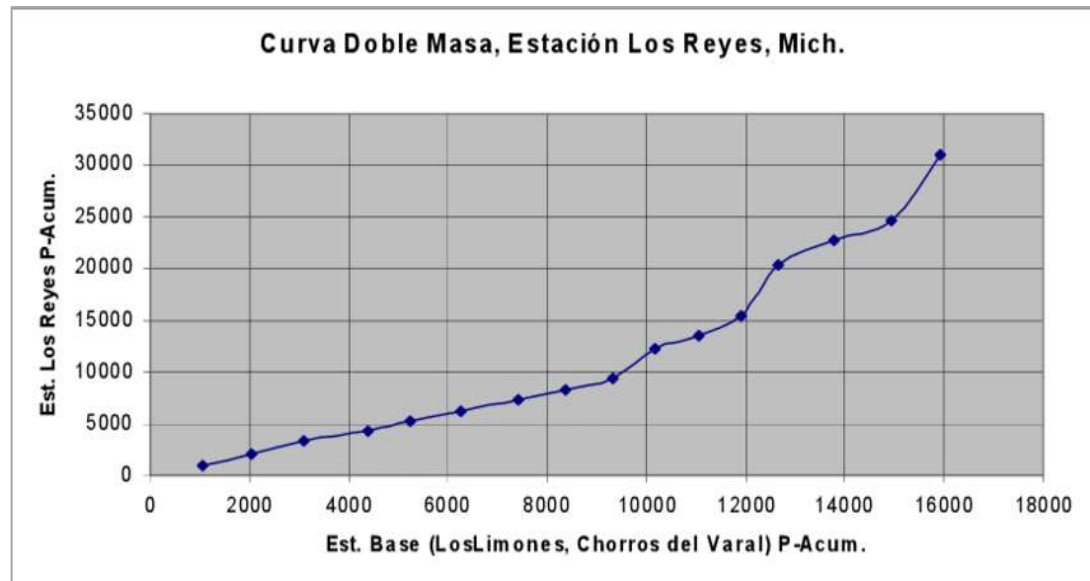
- **Análisis de regresión:** Generalmente se puede identificar que en una serie de valores que posee una regresión de valores con respecto de otra, se puede plantear una línea que se denomina como línea de regresión que generalmente se pretende ajustar a las nubes de punto que se tiene, de los tipos de regresión se pueden identificar los siguientes métodos:
  - o Regresión lineal simple
  - o Regresión lineal múltiple
  - o Regresión no lineal
- **Análisis de consistencia y ajuste del registro pluviométrico**

Para las series de datos aplicados a estudios hidrológicos se tiene que realizar una identificación de inconsistencias o heterogeneidades. Las inconsistencias pueden ser generadas por diversos factores antrópicos o fallas en la calibración del equipo de registro. Es por ello que se hace necesaria la aplicación de técnicas con el fin de corregir los errores para no alterar el proceso de los resultados, los cuales son:

- Dobles masas: Esta metodología se sustenta a partir de la elaboración de una gráfica de precipitaciones acumulados de la estación con la cual se pueda establecer la consistencia de los valores, en comparación con los valores de la media acumulada de las estaciones que caracterizan sus datos con una consistencia alta al cual se denomina "Patrón de Precipitaciones".

**Figura 11**

*Tipos de lluvia*



*Nota.* Se observa un gráfico representativo de curva de doble masa. Autor: Gutiérrez (2014).

Si de la gráfica se puede identificar que ambas series mantiene una relación estable, ósea que los incrementos corresponden de manera proporcional a los valores de referencia, y por lo mismo tendrá una tendencia lineal, en caso contrario la serie presente quiebres en su gráfica se considerará que la estación no posee valores estables para la investigación hidráulica.

### 2.2.6. Prueba de consistencia y contrastación de hipótesis

De lo realizado con la metodología de dobles masas se puede identificar las inconsistencias de las series de los datos, sin embargo, esta metodología no introduce los valores de grado con el cual se pueda demostrar la inconsistencia de los valores dando así paso a la determinación de dicho factor a partir de los siguientes aplicativos estadísticos:

- Método Wilcoxon o Mann-Whitney: Para la comprobación de 2 muestras independientes ( $c_i, y_i$ ) ( $i=1\dots n, j=1\dots m$ ) que se generan o no de la misma población de análisis, pero no necesariamente con una distribución normal.
- Método Mann-Kendall: Para la detección de tendencias y por consiguiente la determinación de las inconsistencias en la serie de datos, esta metodología también sirve para la caracterización de los valores entremezclados.

- Método de Von Neumann: Para esta metodología facilita aplicar la información de carácter regional de manera similar a las de las dobles acumulaciones.
- Método Kolmogorov-Smirnov: Esta metodología sirve para contrastar la homogeneidad entre series, con esta metodología se puede determinar las desviaciones acumuladas estandarizadas.

### 2.2.7. Registros pluviométricos

Se sabe que las precipitaciones suscitadas en un punto determinado son procesos denominados estocásticos con características de periodicidad e intensidad variable, es por ello que se para el análisis de una precipitación se tiene que tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Intensidad promedio de lluvia
- Intervalo temporal entre precipitaciones
- Volumen de precipitación
- Duración de lluvia

Para los cálculos de precipitación uno de los parámetros más importante es la del volumen total (P), el cual puede ser determinado a partir de la ecuación:

$$P = I \times t$$

De la expresión se sabe:

$I$  = Intensidad media

$t$  = Duración

Esta expresión puede ser aplicada para otras unidades de la siguiente forma:

$$I = \frac{P \times 60}{t}$$

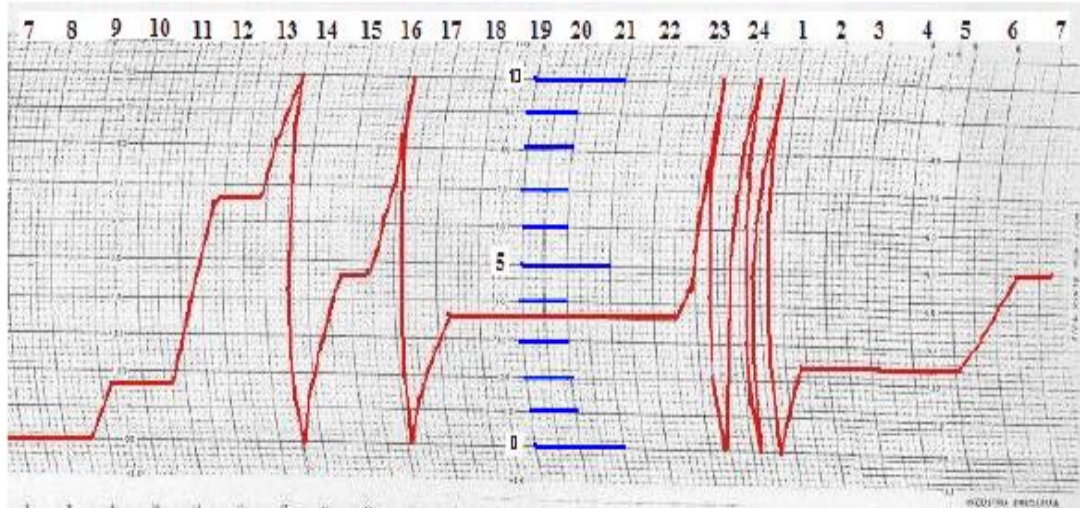
De la expresión se sabe:

$I$  = Intensidad en mm/h

$t$  = Duración min

### Figura 12

*Pluviograma*



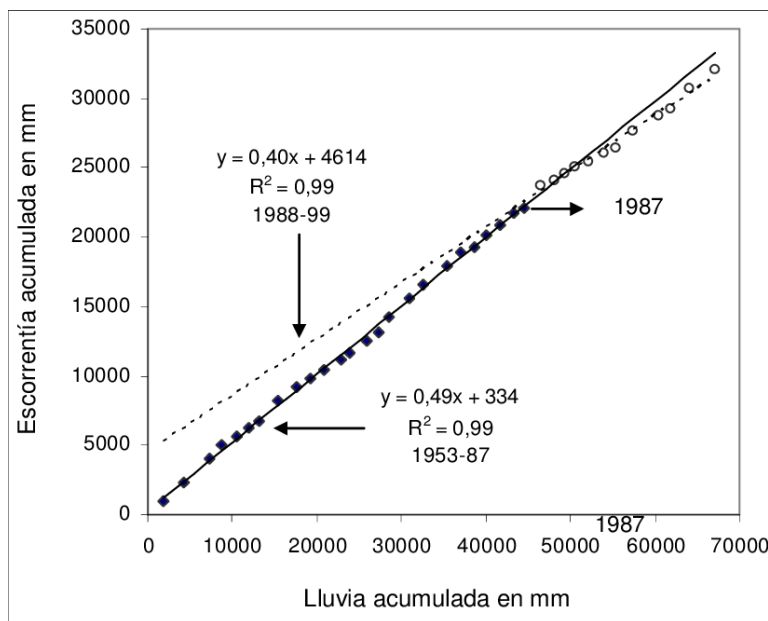
*Nota.* Se observa un gráfico representativo de pluviograma. Autor: Gutiérrez (2014).

- **Curvas de masa**

Por lo general los valores de precipitación de una tormenta que han sido registrados por una o varias estaciones, estos valores generalmente son registrados de manera acumulada en mm relacionado directamente en un determinado tiempo hrs, estos gráficos son catalogados como curvas de masa para precipitación.

**Figura 13**

*Curva masa*



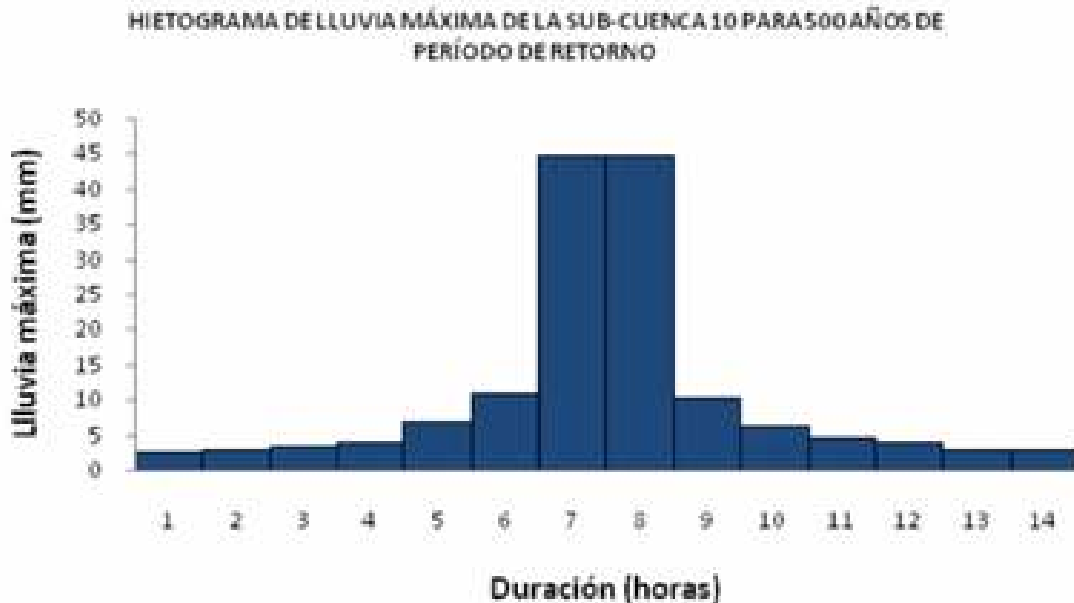
*Nota.* Se observa un ejemplo de curva de doble masa para datos de precipitación. Gutiérrez (2014).

- **Hietograma**

Generalmente las precipitaciones se distribuyen en un gráfico de barras que se representa a partir de intervalos de tiempo en relación a la precipitación, a este diagrama se le denomina hietograma.

**Figura 14**

*Hietograma*



*Nota.* Se observa un gráfico representativo de hietograma. Autor: Gutiérrez (2014).

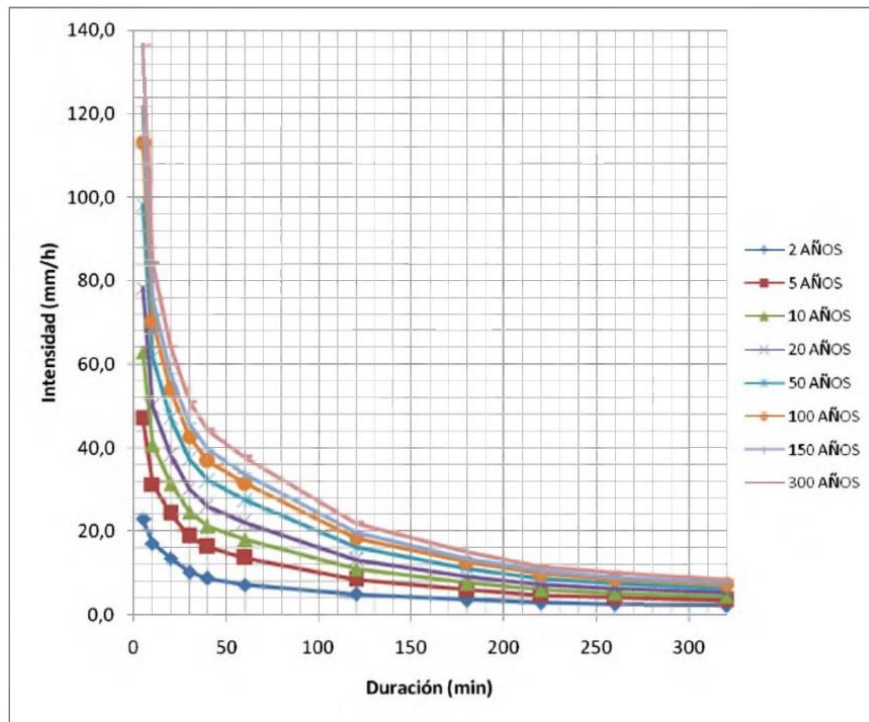
- **Análisis de lluvias**

Los valores de la precipitación cambian con respecto al tiempo en una misma tormenta y en diferentes duraciones, es por ello que se determina para la investigación el análisis debe incluir tanto las alturas de precipitación, duración y la intensidad, esto se denomina curva de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).

Para los proyectos hidráulicos se requiere plantear los eventos de lluvia que se van a usar para la determinación del diseño, esto se realiza a partir del análisis de una tormenta de diseño o algún tipo de evento de precipitación que incluya la intensidad de lluvia dentro de sus parámetros, duración y sus frecuencias con los respectivos periodos de retorno para la obra a diseñar. El análisis se puede realizar a partir de las duraciones de 5, 10, 15, 30 45 minutos o 1, 2, 3, 6, 12, 24 hrs. Los valores mínimos se encuentran a los 5 minutos o en 24 hrs como máximo. Para la gráfica de la curva IDF se relaciona los valores de intensidad (I) en relación con la duración (D) en escala logarítmica en los periodos de retorno requerido para el diseño.

**Figura 15**

*Curva IDF*



*Nota.* Se observa un gráfico representativo de curvas IDF: intensidad, duración y frecuencias. Autor: Gutiérrez (2014).

- **Variabilidad de precipitación**

Los eventos de precipitación varían de acuerdo a la ubicación espacial en la que se encuentre que se relaciona directamente con los factores de circulación atmosférica conjuntamente con los factores locales en las que se encuentra. Para la investigación hidrológica uno de los factores determinantes para la realización, es la recolección de información de precipitaciones, dicha información se calcula a partir de las alturas de lluvia medidas en mm. Para la evaluación de precipitaciones puntuales en una zona, es importante basar los cálculos con información perteneciente a una red pluviométrica, las determinaciones se pueden realizar a partir de las siguientes metodologías:

- Método de la media aritmética: Es de las metodologías más simples en la cual se estima el promedio de precipitación tomando en consideración a las estaciones pluviométricos que se encuentran dentro de la cuenca de análisis, para que los valores tengan una información representativa se tiene que considerar solo estaciones que se encuentren en una red con datos de densidad consistente a partir de la siguiente expresión:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

De la cual se sabe:

$P_i$  = Precipitación media de las estaciones  $i$

$n$  = Cantidad de estaciones dentro de la cuenca

- Media aritmética relacionada a la altitud y orientación de la cuenca: esta metodología se basa en las características de altitud y orientación de la cuenca que se relacionan entre si mediante polígonos de influencia, a partir de la siguiente expresión:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i P_i}{A}$$

Del cual se sabe:

$A$  = Área de la cuenca

- Metodología de Thiessen: Esta metodología se basa en que en cualquier parte de una cuenca las precipitaciones son las mismas para las registradas en las estaciones cercanas, el cual se puede expresar con la siguiente expresión:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i P_i}{A}$$

Del cual se sabe:

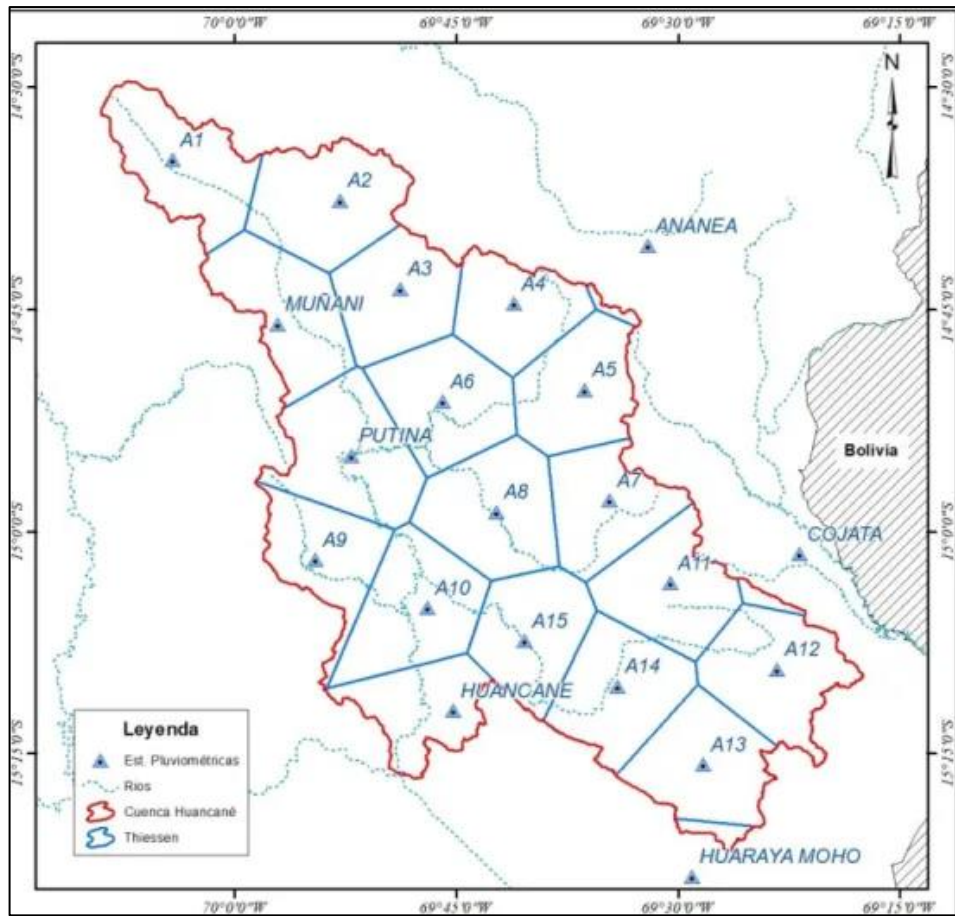
$a_i$  = Área de influencia del polígono

$P_i$  = Precipitación de una estación determinada

$A$  = Área de la cuenca

**Figura 16**

*Polígono de Thiessen*



*Nota.* Se observa un mapa representativo de polígonos de Thiessen. Autor: Gutiérrez (2014).

- Método de la media aritmética relacionada con las alturas: Esta metodología se aplica de la misma manera que en los polígonos de Thiessen adicionándole el parámetro altitudinal entre dos estaciones cercanas de la cuenca, esta metodología al igual que la de Thiessen presentan una alta dificultad debido a la inclusión de varios parámetros y la relación con la expresión matemática.
- Interpolación en relación a la distancia: Aun así, las metodologías presentan un análisis de las distancias en las formulaciones, se tiene que plantear una vista generalizada la siguiente expresión que da un análisis más profundo de los valores en distancia vinculadas con la precipitación:

$$p(x, y) = \frac{\sum_i^N \frac{p_i}{d_i^b(x, y)}}{\sum_i^N \frac{1}{d_i^b(x, y)}}$$

De la expresión se sabe que N y b son los parámetros que identifican a la forma, dentro de ella se encuentran las características topográficas, las características de lluvia e incluso la densidad de la red hidrológica.

- Método de las isoyetas: Esta metodología se basa en el trazo de los datos pluviométrico. Los resultados obtenidos se representan de manera similar a las de las líneas topográficas de curvas de nivel, pero representado por el valor de lluvia constante, dichas isoyetas se trazan sobre los planos topográficos y estas a su vez separan las zonas de precipitación mayor de una de zonas con precipitaciones menores, generalmente los valores e las isoyetas se trazan cada 100 en 100 mm, en algunos casos los intervalos pueden variar. Los valores de la precipitación promedio se puede establecer a partir de la siguiente expresión:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i P_i}{a_i}$$

De la expresión se puede establecer:

$a_i$  = Área entre isoyetas

$P_i$  = Valor promedio entre isoyetas

**Figura 17**

*Polígono de Thiessen*



*Nota.* Se observa un mapa representativo de polígonos de Thiessen. Autor: Gutiérrez (2014).

### 2.2.8. Crecientes

Según Gutiérrez (2014) se puede definir a una creciente como la ocurrencia de un evento que genere un incremento de los caudales de una forma relativamente grande, esto puede ocasionar inundaciones o fallas estructurales en algunas edificaciones:

- **Cálculo de crecientes** Para el diseño de las estructuras hidráulicas es necesario obtener el hidrograma de creciente con lo cual se puede analizar desde el inicio del aumento de la escorrentía superficial hasta el que finalice esta.
- **Pronóstico de crecientes** Para el cálculo de la creciente se realiza a partir de extrapolaciones con los datos históricos para las situaciones críticas, se puede plantear que, si se tiene los  $n$  años de datos históricos y se necesitan calcular los valores de caudal establecidos para un periodo de retorno de  $m$  años, de la cual se puede establecer  $m > n$ .

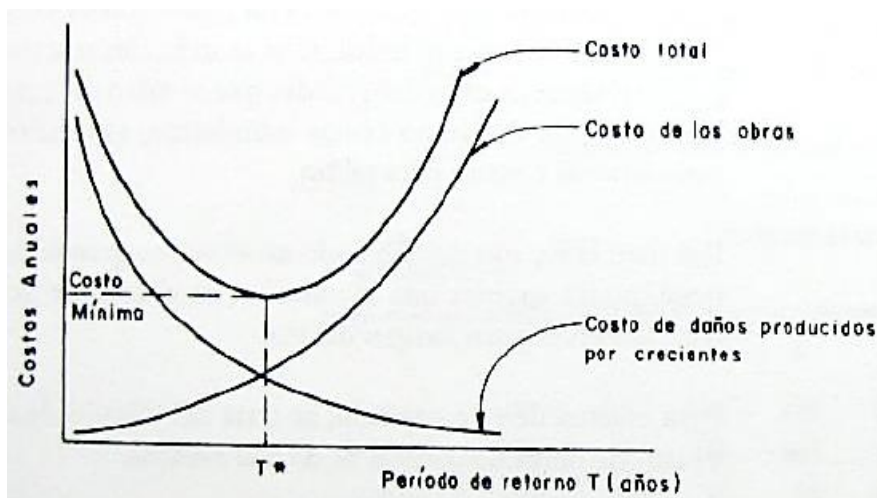
- **Periodo de retorno**

Se denomina periodo de retorno al tiempo en promedio, en años en el cual el valor del caudal pico estimado en una creciente puede ser igualado o superado al menos una vez, este valor se puede estimar a partir de los siguientes factores:

- **Criterios económicos:** Estos se fundamentan en la comparación de los costos anuales de obras frente a los daños generados por el incremento de los caudales.

#### Figura 18

*Costos anuales para determinación de periodo de retorno*



*Nota.* Se presenta un ejemplo de costos anuales para determinación de períodos de retorno. Autor: Villón (2004).

- **Criterios usuales:** Para la determinación del periodo de retorno generalmente cuando se tienen estructuras hidráulicas se tiene en cuenta los siguientes parámetros:
  - ❖ Vida útil
  - ❖ Tipo de estructura
  - ❖ Fragilidad de mantenimiento
  - ❖ Peligro de vidas humanas

**Tabla 2**

*Periodos de retornos según el tipo de proyectos*

Tipo de proyecto	Periodo de retorno
Desviación de crecientes en proyectos hidroeléctricos	25 a 50 años
Rebosaderos para crecientes de proyectos hidroeléctricos, dependiendo de si la presa es de tierra o enrocado o de concreto	Mayor o igual a 1000 años, o criterio de creciente máxima probable
Colectores de aguas lluvias en ciudades, dependiendo del tipo de zona dentro de la ciudad	2 a 10
Alcantarillas para carreteras	11 a 5

*Nota.* Periodos de retornos que se usan según el tipo de proyectos. Autor: Villón (2004).

- **Criterio de riesgo:** Otro de los criterios estimados para la elección del periodo de retorno es del análisis de riesgo por falla de una determinada estructura debido a un fallo en cierta cantidad de años, esta metodología se puede aplicar a partir de la siguiente expresión:

$$T = \frac{1}{1 - (1 - k)^{\frac{1}{n}}}$$

**Tabla 3***Valores del periodo de retorno*

Riesgo permisible	Vida útil de las obras, n (años)									
	k	1	2	3	5	10	25	50	100	200
0.01	100	199	299	498	995	2488	4975	9950	19900	
0.02	50	99	149	248	495	1238	2475	4950	9900	
0.05	20	39	59	98	195	488	975	1950	3900	
0.10	10	19	29	48	95	238	475	950	1899	
0.25	4	7	11	18	35	87	174	348	695	
0.50	2	3	5	8	15	37	73	145	289	
0.75	1.3	2	2.7	4.1	7.7	18	37	73	144	
0.99	1.0	1.11	1.27	1.86	2.7	5.9	11	22	44	

*Nota.* Se presentan los valores del periodos de retorno en función del riesgo permisible (k) y de la vida útil de las obras (n). Autor: Villón (2004).

- **Análisis de naturaleza de los caudales**

Debido a que las precipitaciones no son completamente aleatorias ya que estos dependen de algunas variables como la geología, vegetación, topografía, etc. La naturaleza de los datos recolectados se puede ajustar a las siguientes distribuciones estadísticas:

- ❖ Distribución Normal
- ❖ Distribución Log-normal
- ❖ Distribución de Gumbel
- ❖ Distribución Log-Gumbel
- ❖ Distribución Pearson Tipo III
- ❖ Distribución log-Pearson Tipo III
- ❖ Método de Fuller

- **Métodos de pronósticos de crecientes basado en lluvia**

- Hidrograma unitario: A partir de la realización de un diagrama unitario de la tormenta generada, se puede calcular el hidrograma de crecida de escorrentía superficial que corresponda a una precipitación dada. Cada tipo de lluvia se encontrará con un periodo de retorno que es equivalente al periodo de retorno de la creciente.
- Fórmula general: la cual se basa a partir de la siguiente expresión:

$$Q = Ci_m A$$

De la expresión se sabe:

$Q$  = Caudal pico

$i_m$  = Intensidad media

$A$  = Área de la cuenca

$C$  = Coeficiente de escorrentía

- Ecuación de Fhruling:

$$\frac{i}{i_0} = 1 - 0.009\sqrt{r}$$

De la cual se sabe:

$i$  = intensidad de lluvia en distancia  $r$  del centroide de la tormenta

$i_0$  = intensidad de lluvia en el centro de la tormenta

$r$  = distancia al centro de la tormenta

- Fórmula de Kirpich para el tiempo de concentración

$$T_c = \left( 11.9 \frac{L^3}{h} \right)^{0.385}$$

De la expresión:

$T_c$  = Tiempo de concentración (hrs)

$L$  = Longitud de cauce (millas)

$h$  = Variación de elevación (pies)

- Fórmula de Hathaway

$$T_c^{2.14} = \frac{2}{3} nL\sqrt{S}$$

De la expresión:

$T_c$  = Tiempo de concentración en min

$L$  = Longitud de canal pies

$S$  = Pendiente media

$n$  = coeficiente de rugosidad

#### Tabla 4

*Coeficiente de rugosidad*

Canal hidráulico	n
Limpio, orillas verticales	0.025 – 0.033
Limpio, orillas verticales con malezas	0.030 – 0.040
Serpenteante, algunos charcos	0.033 – 0.045
Tramos muy lentos	0.050 – 0.080
Tramos con muchas malezas	0.075 – 0.150

*Nota.* Se observan diferentes coeficientes de rugosidad según tipos de canales hidráulicos. Autor: Villón (2004).

- Fórmula de George Rivero

$$T_c = \frac{16L}{((1.05 - 0.2p)(100S)^{0.04})}$$

De la expresión se sabe:

$T_c$  = Tiempo de concentración (min)

$p$  = Proporción entre área de suelo con vegetación y área total de la cuenca

$S$  = Pendiente media (m/m)

$L$  = Longitud del canal (km)

- Fórmula de Burkil-Ziegler

$$Q = 0.022MRC \sqrt[4]{\frac{S}{M}}$$

Donde:

$Q$  = Caudal m<sup>3</sup>/s

$M$  = Área de drenaje

$R$  = Intensidad máxima cm/hr

$S$  = Pendiente media

$C$  = Variable

**Tabla 5**

*Coeficiente de rugosidad*

Tipo de superficie	C
Calles pavimentadas y barrios bastante edificadas	0.75
Calles comunes de ciudades	0.625
Poblados con plazas y calles en grava	0.30
Campos deportivos	0.25

*Nota.* Se observa los diferentes coeficientes de rugosidad de superficies. Autor: Villón (2004).

- Fórmula de Kresnik

$$Q = \alpha \frac{32}{(0.5 + \sqrt{A})} A$$

De la expresión se sabe:

$Q$  = Caudal pico ( $m^3/s$ )

$A$  = Área de drenaje ( $km^2$ )

$\alpha$  = Coeficiente 0.03-1.61

- Fórmula de Creager

$$Q = 46CA^{0.897A^{-0.048}}$$

$Q$  = Caudal pico (l/s)

$A$  = Área de drenaje ( $mi^2$ )

$C$  = Coeficiente adimensional

- Fórmula de Baird y McIlwraith

$$Q = \frac{13100A}{(107 + A)^{0.78}}$$

$Q$  = Caudal pico (l/s)

$A$  = Área de drenaje ( $mi^2$ )

La fórmula de Creager y la de Baird son estimaciones realizadas a partir de máximas crecientes registrada a nivel mundial.

### 2.2.9. Sistema de Información Geográfica en la hidrología

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la hidrología son dos campos de trabajo que comparten muchos intereses. Por esa razón, cada vez más investigadores se ayudan de los SIG para la construcción de modelos hidrológicos, especialmente cuando es necesaria la representación espacial de redes de drenaje.

### 2.2.10. Concepto de modelo

- **Definición y características de un modelo**

Un modelo se entendió como una representación simplificada de la realidad que buscó describir, explicar o predecir el comportamiento de un sistema determinado. Su función principal fue abstraer los elementos más relevantes de un fenómeno para analizarlos bajo un marco estructurado, reduciendo así la complejidad inherente a los sistemas naturales o artificiales. Los modelos se construyeron a partir de supuestos y variables que, al interactuar entre sí, permitieron simular procesos, estimar resultados y establecer posibles escenarios de cambio (Schwenzer et al., 2021).

Entre las características fundamentales de un modelo se incluyeron la simplicidad, la capacidad predictiva, la flexibilidad y la validación frente a la realidad. Estas cualidades aseguraron que la representación pudiera ser comprensible y útil para los investigadores y tomadores de decisiones. Además, los modelos se ajustaron a

objetivos específicos, de manera que su diseño dependió del tipo de problema a resolver y del nivel de precisión requerido (Hou et al., 2024).

- **Tipos de modelos en ciencias e ingeniería**

En ciencias e ingeniería, los modelos se clasificaron en diversas categorías según su finalidad, estructura o nivel de complejidad. Entre ellos destacaron los modelos físicos, que reprodujeron procesos a escala reducida mediante experimentos de laboratorio; los modelos conceptuales, que describieron sistemas a través de diagramas o esquemas; y los modelos matemáticos, que se basaron en ecuaciones para representar relaciones cuantitativas. Cada tipo cumplió un papel específico en la comprensión y análisis de fenómenos (Regenwetter et al., 2022).

Asimismo, existieron modelos deterministas, que ofrecieron resultados únicos bajo condiciones establecidas, y modelos probabilísticos, que consideraron la incertidumbre inherente a los sistemas naturales. En ingeniería también se aplicaron modelos computacionales, los cuales integraron datos, fórmulas y algoritmos en un programa especializado para simular condiciones reales con mayor precisión. Esta diversidad permitió seleccionar el modelo adecuado según el propósito y los recursos disponibles (Russo & Stol, 2021).

- **Importancia de los modelos en la gestión de recursos hídricos**

En la gestión de recursos hídricos, los modelos resultaron esenciales porque facilitaron la comprensión de los procesos hidrológicos y permitieron evaluar la disponibilidad, calidad y distribución del agua. Gracias a ellos se pudo analizar cómo influyeron las actividades humanas y los cambios ambientales en las cuencas hidrográficas. Además, los modelos apoyaron la planificación de estrategias sostenibles que integraron el uso eficiente del recurso con la protección de los ecosistemas acuáticos (Schwenzer et al., 2021).

El uso de modelos también fue clave en la toma de decisiones relacionadas con proyectos de infraestructura hidráulica, políticas de manejo del agua y medidas de mitigación de riesgos. A través de escenarios simulados, se lograron prever posibles consecuencias de la explotación del recurso, los impactos del cambio climático y los efectos de fenómenos extremos como sequías o inundaciones. En consecuencia, los modelos constituyeron herramientas indispensables para garantizar una gestión hídrica eficiente y sostenible (Regenwetter et al., 2022).

### **2.2.11. Modelación hidrológica**

- **Fundamentos de la modelación hidrológica**

La modelación hidrológica se basó en la representación matemática y conceptual de los procesos del ciclo hidrológico, tales como la precipitación, la infiltración, la escorrentía superficial y la evapotranspiración. Este enfoque buscó integrar los distintos componentes del sistema hidrológico para comprender sus interacciones y estimar la disponibilidad de agua en diferentes contextos. Para su desarrollo se recurrió a datos hidrometeorológicos y parámetros propios de la cuenca (Pandi et al., 2021).

Entre los fundamentos de esta disciplina destacó la necesidad de establecer balances de agua, formular relaciones entre variables y aplicar principios de conservación de masa y energía. Asimismo, los modelos hidrológicos fueron validados a través de comparaciones entre los valores observados en campo y los resultados simulados, lo que permitió mejorar la precisión de las predicciones. Así, la modelación hidrológica se consolidó como un instrumento de análisis confiable (Pandi et al., 2021).

- **Métodos y enfoques de modelación hidrológica**

Los métodos de modelación hidrológica se dividieron en enfoques empíricos, conceptuales y distribuidos. Los primeros se fundamentaron en relaciones estadísticas simples que vinculaban la lluvia con el escurrimiento, resultando útiles en escenarios con escasa información. Los conceptuales representaron el ciclo hidrológico mediante reservorios interconectados, lo que permitió simular los flujos de agua de manera más realista. Por su parte, los modelos distribuidos incorporaron información espacial detallada, como la topografía o el uso de suelo, aumentando la precisión de los resultados (Sahu et al., 2023).

Cada enfoque presentó ventajas y limitaciones en función del nivel de detalle requerido, la cantidad de datos disponibles y los objetivos del estudio. Los modelos empíricos ofrecieron rapidez y simplicidad, aunque con menor capacidad predictiva, mientras que los distribuidos exigieron mayor información y capacidad de procesamiento, pero brindaron resultados más completos. Esta variedad de métodos permitió seleccionar el más adecuado para cada situación hidrológica (Sahu et al., 2023).

- **Aplicaciones de la modelación hidrológica en estudios de inundaciones**

En los estudios de inundaciones, la modelación hidrológica se convirtió en una herramienta indispensable para identificar áreas en riesgo, estimar caudales máximos

y analizar la respuesta de una cuenca ante eventos extremos de precipitación. A partir de la simulación de tormentas de diseño y de series históricas de lluvia, los modelos ofrecieron estimaciones de los volúmenes de escorrentía generados, información esencial para el dimensionamiento de infraestructuras hidráulicas y medidas de prevención (Keller et al., 2023).

Además, las aplicaciones de estos modelos facilitaron la elaboración de mapas de amenaza y riesgo, apoyando la gestión del territorio y la implementación de sistemas de alerta temprana. La modelación permitió evaluar diferentes escenarios de cambio climático o urbanización, anticipando los impactos en el comportamiento hidrológico de las cuencas. De esta forma, se constituyó en una herramienta clave para la planificación y reducción de desastres naturales relacionados con inundaciones (Keller et al., 2023).

#### **2.2.12. Hydrognomon**

El programa Hydrognomon es una herramienta informática especializada en el análisis y procesamiento de datos hidrológicos. Fue concebido con el objetivo de facilitar el manejo de registros de precipitación, caudales y otros parámetros hidrometeorológicos, permitiendo realizar cálculos, conversiones y simulaciones con rapidez y precisión. Su diseño respondió a la necesidad de contar con un recurso eficiente que apoyara a investigadores, ingenieros y profesionales en la gestión y estudio de recursos hídricos, abarcando tanto aplicaciones académicas como prácticas (Instituto Nacional de Recursos Hídricos de Grecia, 2010).

El origen del programa se remonta al trabajo del Instituto Nacional de Recursos Hídricos de Grecia y el Instituto de Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Técnica de Atenas en el año 2006, donde fue desarrollado como parte de proyectos de investigación y gestión en el ámbito de la hidrología. Su creación estuvo orientada a resolver problemáticas comunes en el procesamiento de información hidrológica, integrando en un solo entorno funciones de análisis estadístico, corrección de series temporales y simulación de eventos extremos. Este enfoque le otorgó gran versatilidad frente a las herramientas disponibles en su momento (Instituto Nacional de Recursos Hídricos de Grecia, 2010).

Con el tiempo, Hydrognomon evolucionó mediante actualizaciones que incorporaron algoritmos avanzados y capacidades gráficas que permitieron visualizar los resultados de manera más clara e intuitiva. Su desarrollo se mantuvo bajo una filosofía de acceso abierto, lo que fomentó su difusión y adopción en diversos proyectos

de investigación y práctica profesional alrededor del mundo. Gracias a su confiabilidad y facilidad de uso, se consolidó como uno de los programas más reconocidos en el campo de la hidrología aplicada (Instituto Nacional de Recursos Hídricos de Grecia, 2010).

### **2.2.13. HEC-HMS en el análisis hidrológico de inundaciones**

El programa HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) es una herramienta computacional desarrollada por el Hydrologic Engineering Center con el propósito de representar el comportamiento hidrológico de cuencas hidrográficas. Su concepción responde a la necesidad de disponer de un sistema flexible capaz de simular los procesos que controlan la transformación de la lluvia en escorrentía, tales como la infiltración en el suelo, la retención superficial, el almacenamiento en el terreno y el enrutamiento del flujo a través de cauces y embalses. La estructura modular del programa permite al usuario seleccionar diferentes métodos para cada proceso hidrológico, lo que facilita su adaptación a condiciones fisiográficas y climáticas diversas (Regenwetter et al., 2022).

En los estudios de inundaciones, HEC-HMS resulta esencial porque proporciona los hidrogramas de salida que representan la variación temporal de los caudales generados en la cuenca ante un evento de precipitación. Dichos hidrogramas, calibrados con datos observados o estimados mediante análisis de frecuencia, constituyen la entrada principal para los modelos hidráulicos como HEC-RAS. De este modo, HEC-HMS cumple la función de nexo entre la información pluviométrica y la caracterización hidráulica del cauce, permitiendo estimar los caudales máximos asociados a distintos periodos de retorno y facilitando así la evaluación del riesgo hidrológico en comunidades vulnerables (Regenwetter et al., 2022).

La versatilidad de HEC-HMS se refleja en su capacidad para ejecutar simulaciones tanto de eventos aislados de tormenta como de series continuas de precipitación, lo que amplía el rango de análisis en estudios hidrológicos. Asimismo, su aplicación en proyectos de gestión de inundaciones contribuye a una mejor comprensión de la respuesta de la cuenca frente a precipitaciones extremas, apoyando la planificación de infraestructuras de control hidráulico, sistemas de alerta temprana y medidas de mitigación. En consecuencia, el programa se constituye en un componente fundamental dentro del ciclo de modelación hidrológica–hidráulica, al proveer información cuantitativa confiable sobre los caudales que alimentan los escenarios de inundación en áreas de estudio específicas (Regenwetter et al., 2022).

#### **2.2.14. HEC-RAS para inundaciones**

El programa HEC-RAS (River Analysis System) fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center – HEC) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, con el propósito de analizar y simular el flujo en ríos y canales. Este programa constituye una de las herramientas más difundidas a nivel internacional para la modelación hidráulica, ya que permite representar el comportamiento del flujo bajo condiciones de régimen permanente y no permanente, tanto en cauces naturales como en estructuras hidráulicas asociadas (puentes, alcantarillas, diques, entre otros). La robustez de HEC-RAS radica en su fundamento matemático, basado en la resolución de las ecuaciones de Saint Venant, que describen la conservación de la masa y la cantidad de movimiento en un flujo unidimensional o bidimensional (Schwenzer et al., 2021).

En el ámbito de la gestión de riesgos por inundaciones, HEC-RAS desempeña un rol fundamental, pues posibilita calcular el nivel del agua en diferentes secciones del cauce en función de los caudales de entrada, así como estimar velocidades, tirantes y extensiones laterales del flujo. Esto permite evaluar con detalle las zonas donde se podría producir desbordamiento y cuantificar la magnitud de la afectación sobre el entorno. De esta manera, HEC-RAS se convierte en un instrumento técnico indispensable para determinar áreas críticas y planificar medidas de protección en asentamientos humanos, infraestructura vial y suelos agrícolas ubicados en llanuras aluviales (Schwenzer et al., 2021).

Otro aspecto relevante es la capacidad del programa para integrarse con sistemas de información geográfica, lo que facilita la representación cartográfica de los resultados. A través de estas herramientas, es posible generar mapas de inundación que muestran la extensión espacial de las zonas anegadas y la distribución de profundidades y velocidades. Estos productos no solo tienen un alto valor técnico, sino que también resultan esenciales para la toma de decisiones de autoridades locales y organismos de gestión del riesgo. En síntesis, HEC-RAS constituye la etapa hidráulica dentro de la secuencia de modelación hidrológica–hidráulica, permitiendo traducir los caudales generados en la cuenca en escenarios concretos de inundación (Schwenzer et al., 2021).

#### **2.2.15. Modelación hidráulica**

- **Principios de la modelación hidráulica**

La modelación hidráulica se fundamentó en las leyes físicas que rigen el movimiento del agua, principalmente las ecuaciones de la conservación de la masa y del momento. Este tipo de modelación buscó describir el flujo en ríos, canales, embalses y redes de distribución, a fin de comprender su comportamiento bajo diferentes condiciones. Para ello, se consideraron variables como velocidad, caudal, presión y nivel del agua (Brunner et al., 2021).

Los principios básicos incluyeron el uso de ecuaciones diferenciales, tales como la de Saint-Venant, que representaron el flujo no permanente en canales abiertos. Asimismo, se incorporaron relaciones empíricas como la fórmula de Manning, que permitió estimar la resistencia al flujo. Estos fundamentos posibilitaron realizar simulaciones precisas y adaptadas a las características de cada sistema hidráulico (Brunner et al., 2021).

- **Herramientas y programas de modelación hidráulica**

En la práctica, la modelación hidráulica se desarrolló mediante herramientas analíticas y programas especializados que facilitaron la resolución de problemas complejos. Dichos programas integraron algoritmos capaces de procesar grandes volúmenes de información, permitiendo representar la geometría de los cauces, las condiciones de borde y las propiedades hidráulicas de los sistemas. Gracias a estas capacidades, se pudieron simular escenarios diversos en menos tiempo y con mayor exactitud (Mignot & Dewals, 2022).

Estos programas ofrecieron interfaces gráficas que permitieron visualizar resultados en forma de perfiles de flujo, mapas de inundación o diagramas de presión. Además, posibilitaron la integración de datos topográficos obtenidos mediante tecnologías modernas, como sistemas de información geográfica y sensores remotos. De este modo, las herramientas computacionales ampliaron las posibilidades de análisis en la ingeniería hidráulica y en la gestión de los recursos hídricos (Brunner et al., 2021).

- **Usos de la modelación hidráulica en la identificación de zonas vulnerables**

La modelación hidráulica fue ampliamente utilizada para identificar zonas vulnerables a inundaciones, erosión y fallas en la infraestructura hidráulica. Mediante simulaciones de caudales extremos y escenarios de crecidas, se determinó la extensión de las áreas susceptibles de ser afectadas, lo que permitió planificar medidas de mitigación y diseñar obras de protección. Esta información resultó esencial para

reducir riesgos en comunidades asentadas cerca de cuerpos de agua (Mignot & Dewals, 2022).

Además, los usos de la modelación incluyeron la evaluación de la capacidad de drenaje urbano y la determinación de puntos críticos en redes de alcantarillado. Gracias a la integración de programas de modelación con información geoespacial, fue posible generar mapas de vulnerabilidad detallados que apoyaron la planificación urbana y la gestión de emergencias. Con ello, se reforzó la importancia de esta herramienta en la prevención y reducción de desastres hídricos (Mignot & Dewals, 2022).

### **2.2.16. Definiciones conceptuales**

**Blance hídrico:** “Cálculo numérico basado en el principio de que el flujo de salida de una cuenca hidrográfica o masa de agua determinadas debe ser igual al flujo de entrada más o menos la variación en el almacenamiento” (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2020).

**Caudal Crítico:** “Condición del caudal en la que la velocidad media corresponde a uno de los valores críticos, generalmente a la profundidad y velocidad críticas de Belanger. Se usa también con referencia a las velocidades críticas de Reynolds que definen el punto en el cual el caudal deja de ser laminar o no turbulento” (OMM, 2020).

**Ciclo hidrológico:** “El ciclo hidrológico es un proceso continuo en el que el agua de los océanos es transportada a la atmósfera, después a la tierra, para regresar luego al océano. Hay muchos sub ciclos. La evaporación del agua tierra adentro, su subsecuente precipitación sobre la tierra y el retorno de esta agua al océano son un ejemplo” (Vélez, 2000).

**Cuenca hidrográfica:** “Las cuencas hidrográficas son espacios territoriales delimitados por un parteaguas (partes más altas de montañas) donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado también punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago (formando una cuenca denominada endorreica) o el mar (llamada cuenca exorreica)” (Cotler et al., 2013).

**Estación pluviográfica:** “Registra en forma mecánica y continua la precipitación, en una gráfica que permite conocer la cantidad, duración, intensidad y periodo en

que ha ocurrido la lluvia. Actualmente se utilizan los pluviógrafos de registro diario” (OMM, 2020).

**Inundación:** “Es un evento natural que se traduce en el desbordamiento en las corrientes de agua, como resultado de lluvias intensas o continuas que, al sobrepasar la capacidad de retención del suelo y de los cauces, inundan en general, aquellos terrenos aledaños a los cursos de agua. Las inundaciones se pueden dividir de acuerdo con el régimen de los cauces en: lenta o de tipo aluvial, súbita o de tipo torrencial y encharcamiento” (OMM, 2020).

**Prevención de riesgo:** “Medidas y acciones de intervención restrictiva o prospectiva dispuestas con anticipación con el fin de evitar que se genere riesgo. Puede enfocarse a evitar o neutralizar la amenaza o la exposición y la vulnerabilidad ante la misma en forma definitiva para impedir que se genere nuevo riesgo. Los instrumentos esenciales de la prevención son aquellos previstos en la planificación, la inversión pública y el ordenamiento ambiental territorial, que tienen como objetivo reglamentar el uso y la ocupación del suelo de forma segura y sostenible” (OMM, 2020).

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIAL Y MÉTODOS**

#### **3.1. Materiales, Equipos y Software**

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon materiales, equipos y programas especializados que facilitaron la recopilación, procesamiento y análisis de la información hidrológica e hidráulica.

##### **Materiales y técnicas empleadas**

Se recopilaron datos topográficos y registros históricos de precipitación, complementados con un levantamiento topográfico de campo. Asimismo, se elaboraron mapas temáticos utilizando las plataformas Google Earth y ArcGIS, y se descargaron Modelos Digitales de Elevación (DEM) con resolución espacial de 12 m desde el geoservidor Land Viewer, los cuales constituyeron la base cartográfica del estudio. De igual manera, se emplearon bases de datos hidrometeorológicas y cartográficas, entre las que destaca el mapa de tipos de suelo a escala 1:40 000, elaborado a partir de la Zonificación Económica Ecológica (ZEE) de Ayacucho, disponible en el geoportal del Ministerio del Ambiente (MINAM, s. f.).

##### **Equipos utilizados**

Para la obtención de datos de campo se emplearon los siguientes instrumentos:

- **Estación total**, para el levantamiento topográfico de precisión.
- **GPS diferencial**, destinado a la georreferenciación y control de puntos.
- **Dron Autel EVO II**, utilizado en la captura de imágenes aéreas y generación de modelos digitales del terreno.

##### **Software especializado**

En el procesamiento y análisis de la información se aplicaron herramientas digitales de uso técnico y científico:

- **Google Earth**, para la visualización y digitalización de información geográfica.
- **ArcGIS y QGIS**, para el procesamiento de datos espaciales y elaboración de mapas temáticos.
- **Autodesk Civil 3D**, para el modelamiento y diseño topográfico.
- **Hydrognomon**, empleado en la gestión y análisis de series temporales hidrológicas.

- **WMS 11.0**, empleado en la delimitación de cuencas y el cálculo de parámetros morfométricos.
- **HEC-HMS**, para la simulación hidrológica de eventos de precipitación-escorrentía.
- **HEC-GeoRAS**, complemento de ArcGIS para la preparación de geometrías hidráulicas.
- **HEC-RAS**, utilizado en la modelación hidráulica y análisis del comportamiento del flujo en ríos y canales.

### **3.2. Diseño metodológico**

De acuerdo al alcance de información por parte de Hernández et al. (2018) se puede mencionar que la presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, al haberse utilizado métodos y técnicas orientadas a la medición objetiva de variables hidrológicas e hidráulicas, recurriendo al uso de datos numéricos, modelos computacionales y procedimientos estadísticos rigurosos para describir y analizar el comportamiento del río Ucusmayo. El tipo de estudio fue aplicado, al haberse orientado a resolver un problema práctico como la identificación de zonas vulnerables a inundaciones, mediante la aplicación de conocimientos científicos y herramientas especializadas en modelación hidrológica e hidráulica. El diseño fue no experimental, debido a que no se manipularon deliberadamente las variables del entorno, sino que se observó y analizó el fenómeno en su contexto natural a través de modelos y simulaciones. Para desarrollar el proceso investigativo, se empleó un método científico de tipo empírico y lógico, específicamente los métodos analítico, sintético, inductivo y deductivo, los cuales permitieron descomponer el sistema fluvial en sus componentes, integrar resultados parciales para comprender el sistema completo, generar inferencias a partir de datos específicos y validar hipótesis desde teorías generales. El nivel de investigación fue descriptivo y explicativo, al haberse caracterizado las propiedades físicas e hidráulicas de la cuenca y, además, al buscar establecer relaciones causa-efecto entre los eventos hidrometeorológicos y la amenaza de inundaciones. Finalmente, el alcance fue transversal, ya que se analizaron los datos en un periodo definido para identificar los efectos de las precipitaciones extremas sobre el comportamiento del cauce, sin necesidad de un seguimiento prolongado en el tiempo.

### **3.3. Población de estudio**

La población de estudio estuvo constituida por la totalidad del cauce del río Ucusmayo, con una longitud aproximada de 7.17 km, ubicado en la localidad de San

Miguel, distrito de San Miguel, provincia de La Mar, departamento de Ayacucho. La muestra se seleccionó mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando criterios de accesibilidad, disponibilidad de información hidrológica y relevancia del área frente a eventos de inundación. Finalmente, la muestra quedó definida por el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucusmayo, con una longitud aproximada de 1.140 km, el cual fue analizado mediante técnicas de modelación hidrológica e hidráulica con el propósito de identificar las zonas vulnerables a inundaciones.

### **3.4. Procedimientos**

La investigación se realizó en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y puente Ucusmayo con una longitud de 1.140km aproximadamente, ubicados en la capital del distrito de San Miguel (Margen Izquierdo del río) y el sector Huayanay (Margen Derecho del Río).

Primero se identificó la zona de estudio y el punto de aforo, para luego realizar el levantamiento topográfico correspondiente. Concluido el trabajo de campo, se procedió en gabinete a la delimitación de la cuenca utilizando Modelos Digitales de Elevación (MDE) de 12 m de resolución, descargados del geoportal LandViewer (EOS Data Analytics, s. f.). Posteriormente, se determinaron los parámetros morfométricos de la cuenca empleando el programa WMS 11.0. (Aquaveo,2021). Asimismo, se recopilaron datos de precipitación del SENAMHI y de la ANA, provenientes de estaciones cercanas a la cuenca en estudio (La Quinoa, Wayllapampa, Huanta y Pampas), considerando el periodo 1993–2021 por ser el más completo y consistente. Finalmente, se prepararon las series de precipitación máxima en 24 horas para su análisis

Seguidamente se realizó la prueba de datos dudosos y tratamiento estadístico para los datos de precipitación de las diferentes estaciones meteorológicas previamente ya analizadas, dentro de las pruebas se utilizó el método de la curva de doble masa para detectar inconsistencias y corregir series, además de cómo se estimaron los datos faltantes.

Una vez culminado todo ello, se realizó el cálculo de promedios anuales corregidos de precipitación los cuales luego fueron interpolados para generar mapas de distribución espacial y la regionalización para hallar la precipitación media de la cuenca por el método de Isoyetas. Luego se realizó también la clasificación del orden de ríos con Strahler, la generación de curvas de nivel (Contour) y red de drenaje vectorizada (Stream to Feature) en el programa ArcGis. Una vez obtenida la regionalización y mapa de isoyetas, se pudo

obtener los datos de precipitaciones máximas de 24h para el desarrollo del modelado en HEC-HMS

Con ayuda de los datos mencionados en el anterior párrafo, el modelado hidrológico de caudales máximos se llevó a cabo utilizando el programa HEC-HMS (Hydrologic Modeling System, USACE). Para este proceso se emplearon como insumos las precipitaciones intensas obtenidas de hietogramas construidos para diferentes periodos de retorno, que oscilaron entre 5 y 500 años. Asimismo, se consideraron los parámetros físicos y morfométricos de la cuenca, tales como el área de drenaje, el Número de Curva (CN), el tiempo de concentración, el lag time y el coeficiente de escorrentía.

El cálculo de las precipitaciones máximas se efectuó mediante el programa Hydrognomon, que permitió realizar el análisis estadístico de series hidrológicas. En esta etapa, las precipitaciones extremas se ajustaron a diversas funciones de distribución, incluyendo Normal, Log-Normal, Pearson III, Log-Pearson III, Gumbel y Gamma. Posteriormente, dichos ajustes fueron evaluados mediante la prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov–Smirnov, lo que permitió seleccionar a la distribución Gamma como la más adecuada para representar el comportamiento de los datos.

La construcción de curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) se realizó aplicando el método de Dick y Peschke, con el cual se estimaron las precipitaciones para diferentes duraciones. A partir de estas se calcularon las intensidades de lluvia mediante la relación  $I = P/D$ , y con ello se elaboraron las curvas IDF considerando distintos periodos de retorno. Una vez definidas estas curvas, se generaron los hietogramas de diseño empleando el método de bloques alternos propuesto por el U.S. Soil Conservation Service (SCS).

En cuanto a los parámetros de la cuenca, estos fueron obtenidos a partir del procesamiento del modelo digital de elevación (DEM) mediante el programa QGIS. De este modo se calcularon el área, el perímetro, la longitud del cauce, el relieve, la pendiente, el tiempo de concentración (empleando la fórmula de Kirpich) y el lag time. Para determinar el número de curva (CN), se utilizaron los mapas edafológicos disponibles en el geoservidor del MINAM, identificando suelos clasificados como Lithic Cryorthents y Lithic Udorthents, correspondientes al Grupo Hidrológico C. Asimismo, el uso del suelo fue evaluado con base en la Zonificación Ecológica Económica (ZEE) del MINAM, considerando coberturas como herbazal, arbustal, urbano y humedales. Con esta información se asignaron los valores de CN según el manual TR-55 (USDA/SCS), calculándose luego el CN ponderado y la abstracción inicial ( $I_a = 0.2 \times S$ ).

La implementación en el programa HEC-HMS comprendió diversas fases. En el Basin Model Manager se definió la cuenca, el sumidero y la conexión del cauce; en el Time-Series Data Manager se ingresaron los hietogramas con un intervalo de una hora; en el Meteorologic Model Manager se asoció el modelo meteorológico con la cuenca; y en el Control Specifications Manager se configuró la simulación con una duración de doce horas y un intervalo de treinta minutos. Finalmente, la ejecución de la simulación permitió obtener los hidrogramas de escorrentía, los caudales pico y los volúmenes escurridos para cada periodo de retorno analizado.

En cuanto a la información topográfica, esta se obtuvo a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM) de la cuenca del río Ucumayo. Con este insumo se generaron curvas de nivel y se construyó un modelo TIN (Triangulated Irregular Network), lo que permitió una representación tridimensional más precisa del relieve. Complementariamente, se realizó un levantamiento topográfico en campo en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucumayo, utilizando el programa Civil 3D, con el fin de obtener secciones transversales detalladas del cauce.

El procesamiento de la información se llevó a cabo en ArcGIS mediante la extensión HEC-GeoRAS. A partir del modelo TIN se digitalizaron los principales elementos geomorfológicos, como el eje del cauce (Stream Centerline), las márgenes del río (Bank Lines), las trayectorias de flujo (Flow Paths) y las secciones transversales (XSCutlines). Estos elementos fueron generados en tres dimensiones y posteriormente exportados al programa HEC-RAS para la modelación hidráulica.

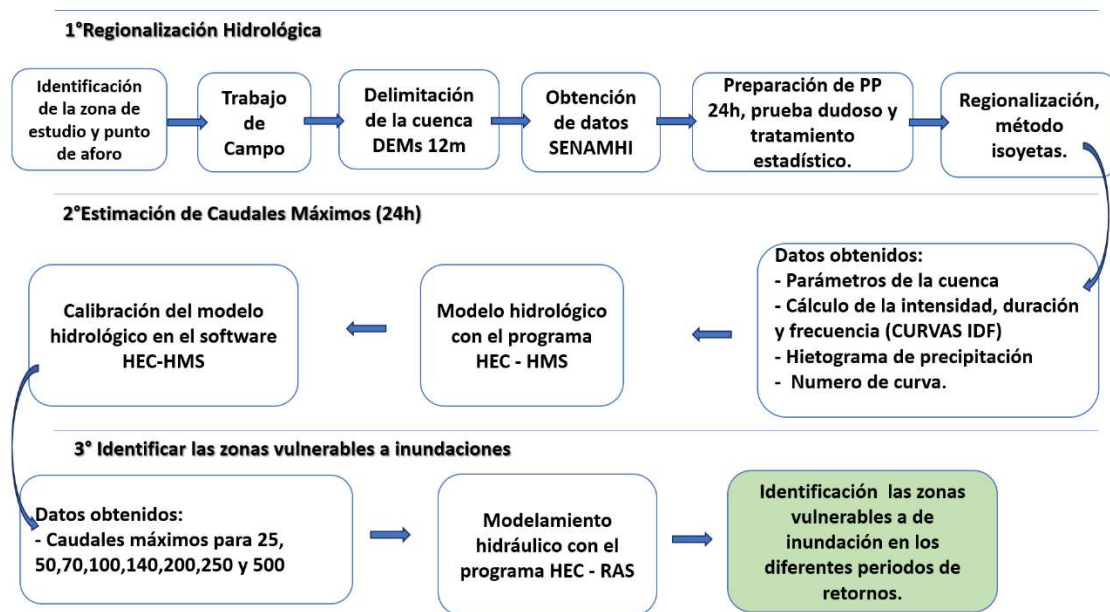
En el programa HEC-RAS se importó la geometría del río y se asignaron los coeficientes de rugosidad de Manning, diferenciando valores de  $n = 0.040$  para el cauce central y  $n = 0.027$  para las márgenes laterales. Se incorporaron los caudales picos determinados en la fase hidrológica para los periodos de retorno de 5, 70 y 500 años, además de la pendiente longitudinal del cauce, estimada en 0.1318 a partir del análisis geomorfológico.

La integración de los datos topográficos y geométricos incluyó la exportación de las secciones transversales levantadas en campo, las cuales fueron incorporadas en el módulo de geometría de HEC-RAS. Allí se definieron las márgenes, los límites del cauce y las progresivas de las secciones. Posteriormente, se configuraron las condiciones hidráulicas de simulación, estableciendo los caudales máximos, la pendiente longitudinal y las rugosidades de Manning como parámetros de entrada.

Una vez configurados los modelos, se ejecutaron las simulaciones en HEC-RAS para cada periodo de retorno considerado. Los resultados fueron representados en vistas tridimensionales (X–Y–Z), secciones transversales y mapas de extensión de inundaciones. Finalmente, se generaron mapas que identificaron las zonas vulnerables a inundaciones bajo diferentes escenarios de recurrencia, constituyendo la base para el análisis de riesgo en el área de estudio.

**Figura 19**

*Orden correlativo del método procedimental*



*Nota.* Se observa el procedimiento general para el modelamiento hidrológico. Autor: Villón (2004)

### 3.5. Nivel y diseño de investigación

El presente estudio tiene un enfoque a nivel de investigación explicativo, transversal:

- **Explicativo:** comprende en establecer relaciones de causa y efecto.
- **Transversal:** Porque se realiza en un tiempo determinado.

### 3.6. Tamaño de muestra

La muestra fue el tramo vulnerable a inundaciones del río Ucumayo que abarca el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y puente Ucumayo ubicados en la capital del distrito de San Miguel (Margen Izquierdo del río) y el sector Huayanay (Margen Derecho del Río) con una longitud de 1.140km aprox.

### 3.7. Variables

Entre las **variables independientes** tenemos:

- Modelamiento hidrológico.

Entre las **variables dependientes** tenemos:

- Zonas vulnerables a inundaciones

### 3.8. Técnicas de recolección de datos

Las técnicas e instrumentos a emplear serán:

#### ✓ Técnicas

- Recopilación de datos topográficos, datos históricos de precipitación, levantamiento topográfico, elaboración de mapas en Google Earth y ArcGis, descarga de Modelos Digitales de Elevación (DEM) con resolución espacial de 12 m, a través del geoportal LandViewer (EOS Data Analytics, s. f.).

#### ✓ Instrumentos

- Estación total, GPS diferencial, Dron Autel EVO II, Google Earth, HEC-HMS, Civil3D, Hydrognomon, WMS 11.0, QGis, ArcGis, HEC-GeoRAS y HEC-RAS.

### 3.9. Indicadores

Se identificaron para cada variable sus respectivos indicadores, con los cuales fueron medidos tal como se observa en la tabla propuesta.

**Tabla 6**

*Operacionalización de variables*

<b>Variable independiente</b>	<b>Indicador</b>
Modelación hidrológica e hidráulica.	- Precipitación (mm)
	- Intensidad (mm/hora)
	- Tiempo de retorno
	- Parámetros geomorfológicos de la Cuenca
	- Caudal(m <sup>3</sup> /s)
	- Tirante(m)
	- Área de la sección transversal(m <sup>2</sup> )
- Elevación (m.s.n.m)	
<b>Variable dependiente</b>	<b>Indicador</b>
Zonas vulnerables a inundaciones	- Ubicación UTM

- 
- Tipo de construcción (rustico, material noble, etc.)
  - Damnificados
  - Extensión de terreno (ha)
- 

*Nota.* Se presentan las variables diferencias por independiente y dependiente, cada una con sus respectivos indicadores.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

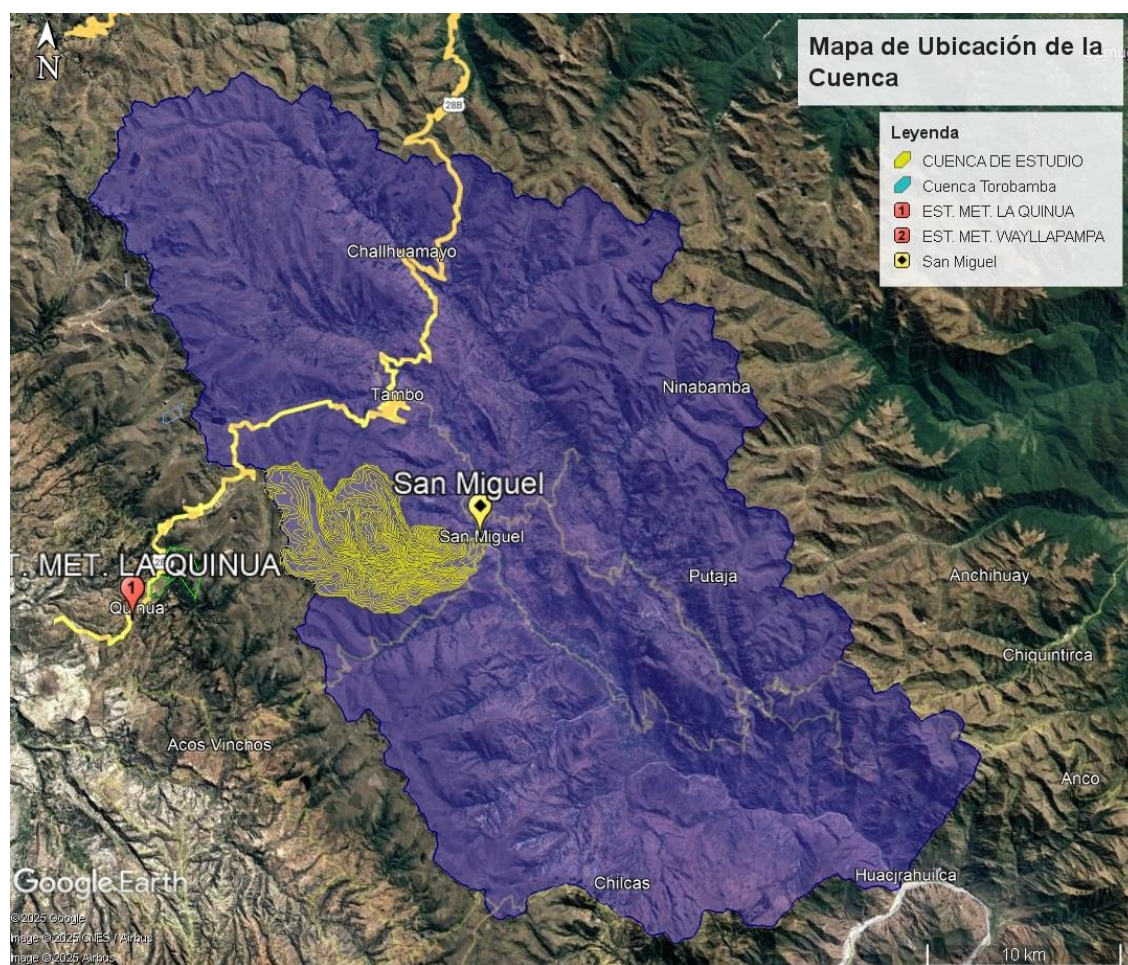
#### 4.1. Regionalización hidrológica

##### 4.1.1. Ubicación de la cuenca y área de estudio

La cuenca bajo estudio se localiza en el departamento de Ayacucho, provincia de La Mar, y desemboca en la localidad de San Miguel. Tal como se muestra en la Figura 20, la delimitación de la cuenca ha sido representada en color amarillo. Esta subcuenca forma parte de la cuenca hidrográfica de mayor escala denominada cuenca de Torobamba. Su ubicación la convierte en un punto de interés para la evaluación del riesgo de inundaciones, especialmente en el tramo inicial de la localidad ya mencionada, donde se concentra infraestructura urbana y actividades socioeconómicas vulnerables ante eventos hidrometeorológicos extremos.

**Figura 20**

*Mapa de ubicación de la cuenca*

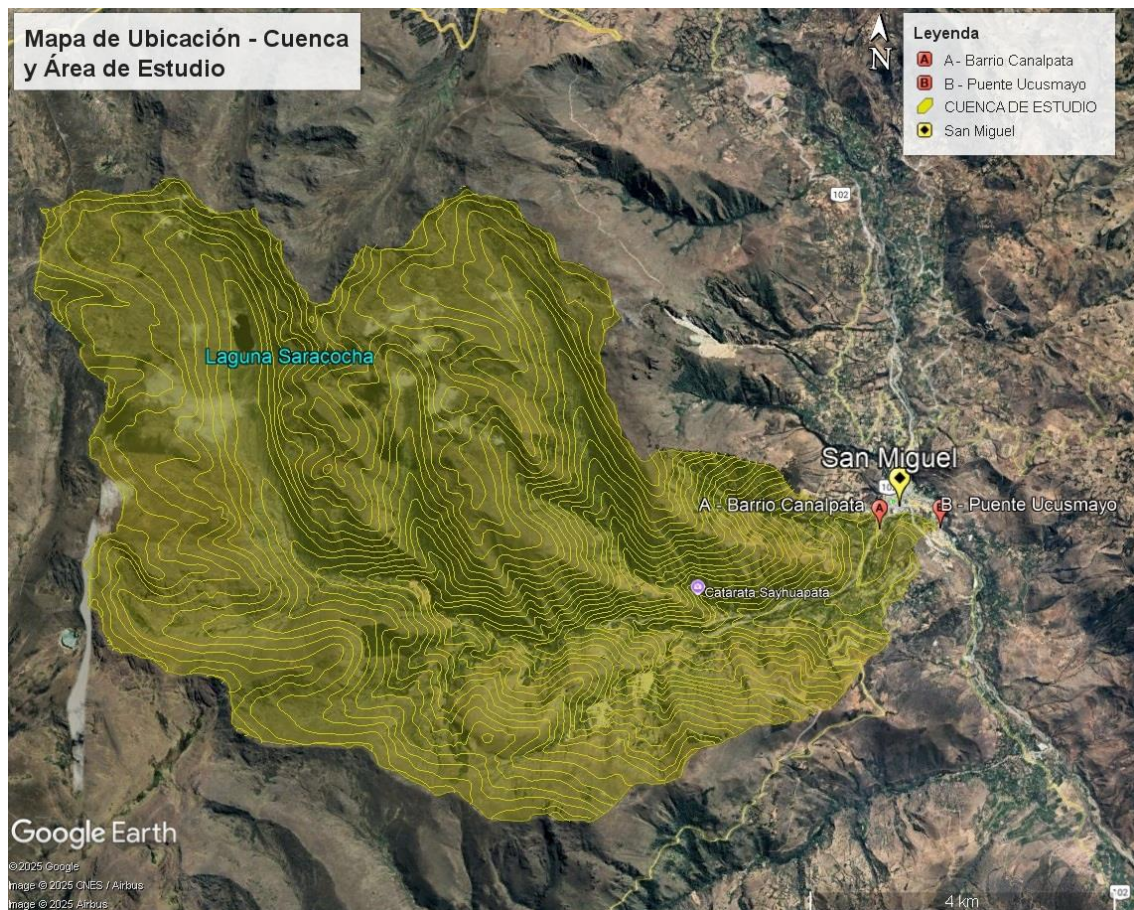


*Nota.* Se presenta la ubicación de la subcuenca respecto a la cuenca a la que pertenece, así como también la ubicación de las estaciones meteorológicas. Adaptado de Google Earth

En la Figura 21 se presenta el mapa detallado de la cuenca en estudio, resaltada en color amarillo. Dentro de esta representación cartográfica, se identifican los puntos A (Barrio Canalpata) y B (Puente Ucumayo), los cuales delimitan el tramo específico de análisis en la presente investigación. Ambos puntos se ubican al inicio de la localidad de San Miguel

**Figura 21**

*Mapa de cuenca y área de estudio*



*Nota.* Se presenta la ubicación de la zona de estudio respecto a la subcuenca. Adaptado de Google Earth

#### 4.1.2. Inventario de estaciones pluviométricas

Para el análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Ucumayo, se recopiló información de cuatro estaciones meteorológicas ubicadas en la región. A

continuación, se detalla el tipo de datos disponibles y su respectivo periodo de registro:

- **Estación meteorológica La Quinua**

Esta estación cuenta con registros de precipitación mensual desde 1990 hasta 2022 y precipitación máxima en 24 horas (MAX24HR) desde 1965 hasta 2022. Asimismo, dispone de datos de temperatura mínima, máxima y media mensual para los años 2010 y 2011. También se cuenta con información de humedad relativa mensual (en %) y velocidad del viento mensual, aunque estos últimos no precisan el periodo temporal correspondiente.

- **Estación meteorológica Wayllapampa**

Esta estación presenta datos de precipitación mensual desde 1993 hasta 2020 y de precipitación máxima en 24 horas desde 1967 hasta 2022. Los registros de temperaturas mínimas mensuales están disponibles desde 2010 hasta 2020, mientras que las temperaturas máximas mensuales cubren el periodo 2006–2020. Las temperaturas medias mensuales están disponibles para los años 2010 y 2020. Adicionalmente, se cuenta con información de humedad relativa mensual entre los años 2006 y 2020. Esta estación proporciona una cobertura relativamente continua y completa de variables climáticas relevantes.

- **Estación meteorológica Huanta**

Los registros de esta estación muestran una mayor discontinuidad. La precipitación mensual está disponible entre 1964 y 1974, luego hay un vacío de datos entre 1975 y 1989, y se reanuda desde 1990 hasta 2021. En cuanto a la precipitación máxima en 24 horas, se dispone de datos desde 1964 hasta 1990, y posteriormente desde noviembre de 1999 hasta 2022, con un vacío entre 1991 y 1998. También se cuenta con datos de evaporación mensual (1964–1974), temperaturas mínimas (1964–1971), media (1964–1974) y máxima mensual (1964 y 1974). La humedad relativa mensual se encuentra disponible entre 1965 y 1974.

- **Estación meteorológica Pampas**

Los registros de precipitación mensual cubren el periodo 1990–2021, y los de precipitación máxima en 24 horas abarcan desde 1973 hasta 2021. La estación también presenta datos de temperaturas máxima, mínima y media mensual correspondientes a los años 2013 a 2017 (aunque la temperatura media solo está

disponible para 2013 y 2017). Se dispone de algunos valores de velocidad del viento mensual para meses específicos de 2008 y enero de 2009. Finalmente, se cuenta con registros de humedad relativa mensual entre 2013 y 2017.

Las estaciones meteorológicas utilizadas para el presente estudio se encuentran ubicadas a diferentes distancias y orientaciones con respecto a la cuenca del río Ucusmayo. La estación La Quinoa se sitúa a 11.67 km al oeste de la cuenca; la estación Wayllapampa, a 20 km también hacia el oeste; la estación Huanta se localiza a una distancia de 28.11 km en dirección noroeste; mientras que la estación Pampas se ubica a 52.72 km al sureste de la cuenca.

**Tabla 7**

*Longitud de datos de cada estación*

<b>Estación Meteorológica</b>	<b>Variable</b>	<b>Periodo de Registro</b>	<b>Longitud de Datos (años)</b>
<b>La Quinoa</b>	Precipitación mensual	1990 – 2022	33
	Precipitación máxima 24h	1965 – 2022	58
	Temperatura (mín., máx., media)	2010 – 2011	2
	Humedad relativa / Viento	No especificado	-
<b>Wayllapampa</b>	Precipitación mensual	1993 – 2020	28
	Precipitación máxima 24h	1967 – 2022	56
	Temp. mín. mensual	2010 – 2020	11
	Temp. máx. mensual	2006 – 2020	15
	Temp. media mensual	2010 y 2020	2
	Humedad relativa mensual	2006 – 2020	15
<b>Huanta</b>	Precipitación mensual	1964 – 1974, 1990 – 2021	22 (con discontinuidades)
	Precipitación máxima 24h	1964 – 1990, 1999 – 2022	51 (con vacíos)
	Evaporación mensual	1964 – 1974	11
	Temperaturas (mín., media, máx.)	1964 – 1974 (según variable)	7 a 11
	Humedad relativa mensual	1965 – 1974	10
<b>Pampas</b>	Precipitación mensual	1990 – 2021	32
	Precipitación máxima 24h	1973 – 2021	49
	Temp. máx., mín. mensual	2013 – 2017	5
	Temp. media mensual	2013 y 2017	2
	Viento mensual	2008 – ene. 2009 (parcial)	-

Humedad relativa mensual	2013 – 2017	5
--------------------------	-------------	---

*Nota.* Se presenta el detalle de los datos por cada una de las estaciones meteorológicas. Datos obtenidos de SENHAMI.

Las coordenadas geográficas de cada estación meteorológica se detallan en la Tabla 8, lo que permite identificar con precisión su localización espacial. Asimismo, en la Figura 22 se presenta el mapa de ubicación de la cuenca y de las estaciones meteorológicas consideradas, facilitando la visualización de su distribución relativa y su influencia potencial sobre el análisis hidrológico.

**Tabla 8**

*Coordenadas de estaciones meteorológicas*

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	Sistema de Coordenadas UTM/WGS84 (Zona 18L)	
	ESTE	NORTE
LA QUINUA	593070	8556572
WAYLLAPAMPA	584940	8554273
HUANTA	577755	8572560
PAMPAS	627280	8514468

*Nota.* Obtenido de Senhami

**Figura 22**

*Mapa de cuenca y estaciones meteorológicas*



*Nota.* Se presenta la ubicación de las estaciones meteorológicas. Adaptado de Google Earth

#### **4.1.3. Validación y corrección de datos pluviométricos**

#### **4.1.4. Complementación de datos faltantes**

Para el análisis hidrológico, se seleccionó el periodo comprendido entre los años 1993 y 2021, ya que corresponde al intervalo en el cual las cuatro estaciones meteorológicas consideradas cuentan con registros relativamente completos. Esta decisión permitió garantizar una base de datos consistente y representativa para el modelado de la cuenca.

Sin embargo, se identificaron datos faltantes correspondientes al año 2016 en dos estaciones: La Quinua y Wayllapampa, donde no se disponía del registro completo de precipitación mensual para ese año. Con el fin de mantener la homogeneidad y

continuidad de los datos, se procedió a la estimación de los valores faltantes utilizando el método de la curva de doble masas.

**Tabla 9**

*Datos de precipitación de SENHAMI - totales de cada año en mm*

<b>AÑO</b>	<b>EST. LA QUINUA</b>	<b>EST. WAYLLAPAMPA</b>	<b>EST. HUANTA</b>	<b>EST. PAMPAS</b>
1993	1085.5	667.4	537.6	735.0
1994	883.0	497.6	485.4	568.0
1995	925.0	460.3	490.3	605.0
1996	818.8	470.5	527.5	693.0
1997	934.2	530.0	552.5	861.0
1998	786.0	410.6	477.3	561.0
1999	895.6	490.2	511.6	636.0
2000	998.9	688.1	608.6	805.0
2001	913.0	839.5	649.6	1169.0
2002	890.4	690.3	559.1	776.2
2003	975.2	532.5	611.5	716.7
2004	918.7	550.4	428.6	683.6
2005	662.3	382.9	439.4	698.0
2006	933.6	590.7	437.8	708.6
2007	825.6	537.7	403.2	727.7
2008	626.4	405.5	290.9	493.9
2009	797.5	631.5	454.2	735.0
2010	718.5	520.5	556.6	925.6
2011	1006.7	771.6	615.7	692.8
2012	767.4	865.1	556.0	846.0
2013	904.0	705.4	641.3	703.0
2014	919.1	664.6	480.5	719.1
2015	484.3	501.0	638.7	794.3
2016			227.3	627.4
2017	864.3	693.6	538.2	1090.8
2018	748.6	628.1	486.7	1088.6
2019	989.1	708.7	583.2	971.4
2020	258.8	291.6	362.4	668.0

2021	284.0	560.0	368.4	1018.4
------	-------	-------	-------	--------

*Notas.* Datos de precipitación obtenidos de Senahmi

Para la aplicación de este método, se consideraron como referencia los datos de las estaciones Pampas y Huanta, seleccionando como estación base a Pampas, debido a que sus registros presentaban una cobertura completa durante todo el periodo de estudio. A través de la curva de doble masas, se determinaron las pendientes de las rectas  $m_1$  y  $m_2$  (antes y después del quiebre), y con ello se calculó el factor de complementación ( $FC = m_1/m_2$ ).

**Tabla 10**

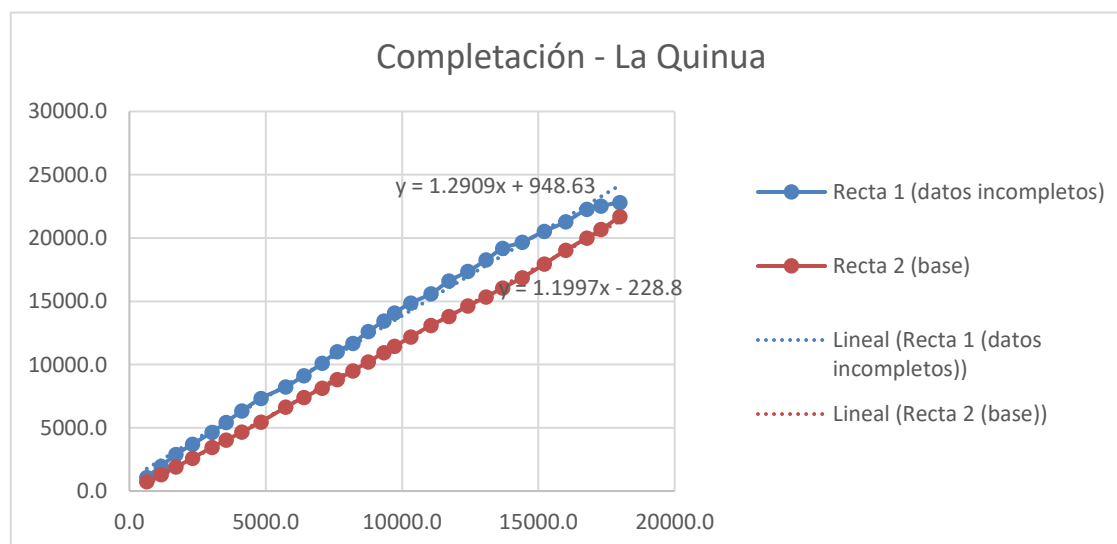
*Pendientes de recta para complementación de datos en estación La Quinua*

m1	1.291
m2	1.997
FC	0.646

*Nota.* Pendientes de la recta según la evaluación por curva de doble masa para completar datos en estación La Quinua.

**Figura 23**

*Curva de masas para completar datos en estación La Quinua*



*Nota.* Curva de doble masa para complementación de datos en estación meteorológica La Quinua.

**Tabla 11**

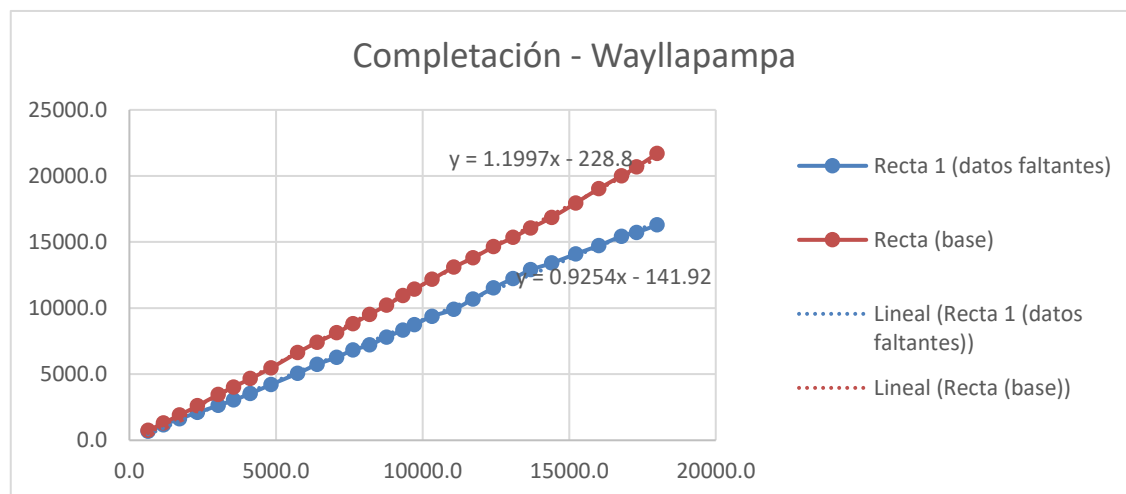
*Pendientes de recta para completar datos en estación Wayllapampa*

m 1	1.1997
m 2	0.925

FC	1.296
----	-------

**Figura 24**

*Curva de masas para complementación de datos en estación Wayllapampa*



*Nota.* Curva de doble masa para complementación de datos en estación meteorológica Wayllapampa.

Finalmente, los valores faltantes del año 2016 fueron estimados multiplicando los datos mensuales correspondientes de la estación base (Pampas) por el factor de complementación obtenido. Este procedimiento fue aplicado de manera independiente para las estaciones La Quinoa y Wayllapampa, garantizando la consistencia metodológica en la reconstrucción de los datos (ver table 11).

**Tabla 12***Datos pluviométricos completados*

<b>AÑO</b>	<b>PROM. ESTACIONES</b>	<b>PROM. ACUM</b>	<b>EST. LA QUINUA</b>	<b>QUINUA ACUM</b>	<b>EST. WAYLLAPAMPA</b>	<b>WAYLLAPAMPA ACUM</b>	<b>EST. HUANTA</b>	<b>HUANTA ACUM</b>	<b>EST. PAMPAS</b>	<b>PAMPAS ACUM</b>
1993	756.4	756.4	1085.5	1085.5	667.4	667.4	537.6	537.6	735.0	735.0
1994	608.5	1364.9	883.0	1968.5	497.6	1165.0	485.4	1023.0	568.0	1303.0
1995	620.1	1985.0	925.0	2893.5	460.3	1625.3	490.3	1513.3	605.0	1908.0
1996	627.4	2612.5	818.8	3712.3	470.5	2095.8	527.5	2040.8	693.0	2601.0
1997	719.4	3331.9	934.2	4646.5	530.0	2625.8	552.5	2593.3	861.0	3462.0
1998	558.7	3890.6	786.0	5432.5	410.6	3036.4	477.3	3070.6	561.0	4023.0
1999	633.3	4524.0	895.6	6328.1	490.2	3526.6	511.6	3582.2	636.0	4659.0
2000	775.1	5299.1	998.9	7327.0	688.1	4214.7	608.6	4190.8	805.0	5464.0
2001	892.8	6191.9	913.0	8240.0	839.5	5054.2	649.6	4840.4	1169.0	6633.0
2002	729.0	6920.9	890.4	9130.4	690.3	5744.5	559.1	5399.5	776.2	7409.2
2003	709.0	7629.9	975.2	10105.6	532.5	6277.0	611.5	6011.0	716.7	8126.0
2004	645.3	8275.2	918.7	11024.3	550.4	6827.4	428.6	6439.6	683.6	8809.6
2005	545.6	8820.9	662.3	11686.6	382.9	7210.3	439.4	6879.0	698.0	9507.6
2006	667.7	9488.5	933.6	12620.2	590.7	7801.0	437.8	7316.8	708.6	10216.2
2007	623.5	10112.1	825.6	13445.8	537.7	8338.7	403.2	7720.0	727.7	10943.8
2008	454.2	10566.2	626.4	14072.2	405.5	8744.2	290.9	8010.9	493.9	11437.7
2009	654.5	11220.8	797.5	14869.7	631.5	9375.7	454.2	8465.1	735.0	12172.7
2010	680.3	11901.1	718.5	15588.2	520.5	9896.2	556.6	9021.7	925.6	13098.3
2011	771.7	12672.8	1006.7	16594.9	771.6	10667.8	615.7	9637.4	692.8	13791.1

2012	758.6	13431.4	767.4	17362.3	865.1	11532.9	556.0	10193.4	846.0	14637.1
2013	738.4	14169.8	904.0	18266.3	705.4	12238.3	641.3	10834.7	703.0	15340.1
2014	695.8	14865.7	919.1	19185.4	664.6	12902.9	480.5	11315.2	719.1	16059.2
2015	604.6	15470.2	484.3	19669.7	501.0	13403.9	638.7	11953.9	794.3	16853.5
2016	518.4	15988.7	405.6	20075.2	813.4	14217.3	227.3	12181.2	627.4	17480.9
2017	796.7	16785.4	864.3	20939.5	693.6	14910.9	538.2	12719.4	1090.8	18571.7
2018	738.0	17523.4	748.6	21688.1	628.1	15539.0	486.7	13206.1	1088.6	19660.3
2019	813.1	18336.5	989.1	22677.2	708.7	16247.7	583.2	13789.3	971.4	20631.7
2020	395.2	18731.7	258.8	22936.0	291.6	16539.3	362.4	14151.7	668.0	21299.7
2021	557.7	19289.4	284.0	23220.0	560.0	17099.3	368.4	14520.1	1018.4	22318.1

*Nota.* Datos total anuales de precipitación de Senahmi complementados por método de curva de doble masa

#### 4.1.5. Corrección de datos

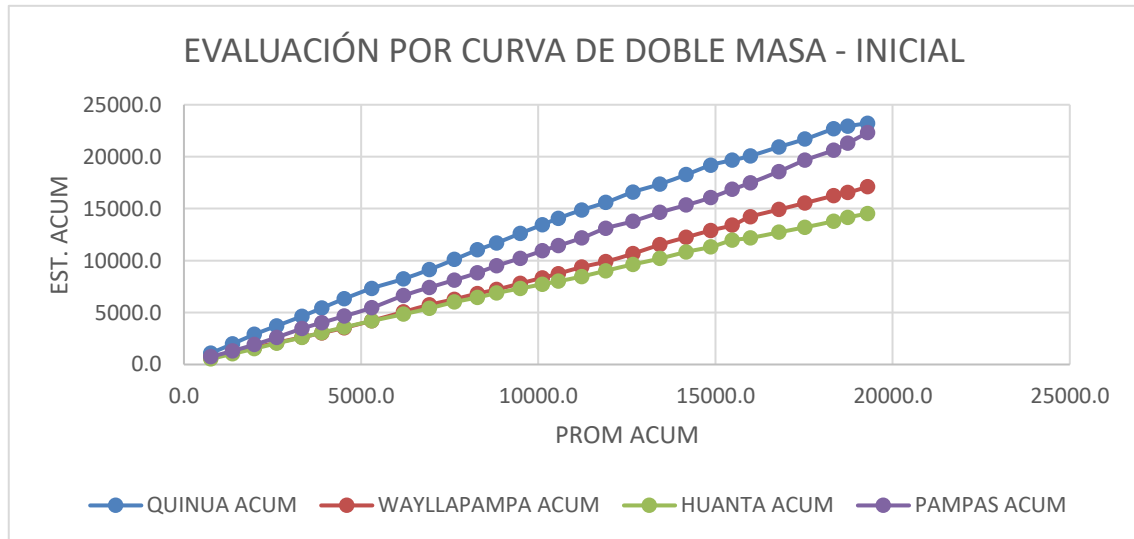
Continuando con el proceso de validación de los datos meteorológicos, se aplicó nuevamente el método de la curva de doble masas, evaluando los resultados presentados en la Tabla 12 y el gráfico correspondiente en la Figura 25. En este gráfico se compara el comportamiento acumulado de cada estación meteorológica frente al promedio de todas las estaciones.

A partir de esta evaluación visual, se identificaron ligeras inconsistencias en las estaciones La Quinua y Wayllapampa, evidenciadas por desviaciones en la pendiente de la curva, lo cual podría indicar variaciones en la calidad o continuidad de los registros. Por esta razón, se consideró necesario corroborar estos datos utilizando como referencia las estaciones guías, que en este caso corresponden a Pampas y Huanta.

Cabe mencionar que, si bien estas dos últimas estaciones mostraron un nivel algo mayor de consistencia en el gráfico, también presentaron ciertas irregularidades, por lo que el análisis debe considerarse con criterio técnico y precaución al momento de aplicar los ajustes o complementaciones necesarias.

**Figura 25**

*Evaluación por curva de doble masa - inicial*



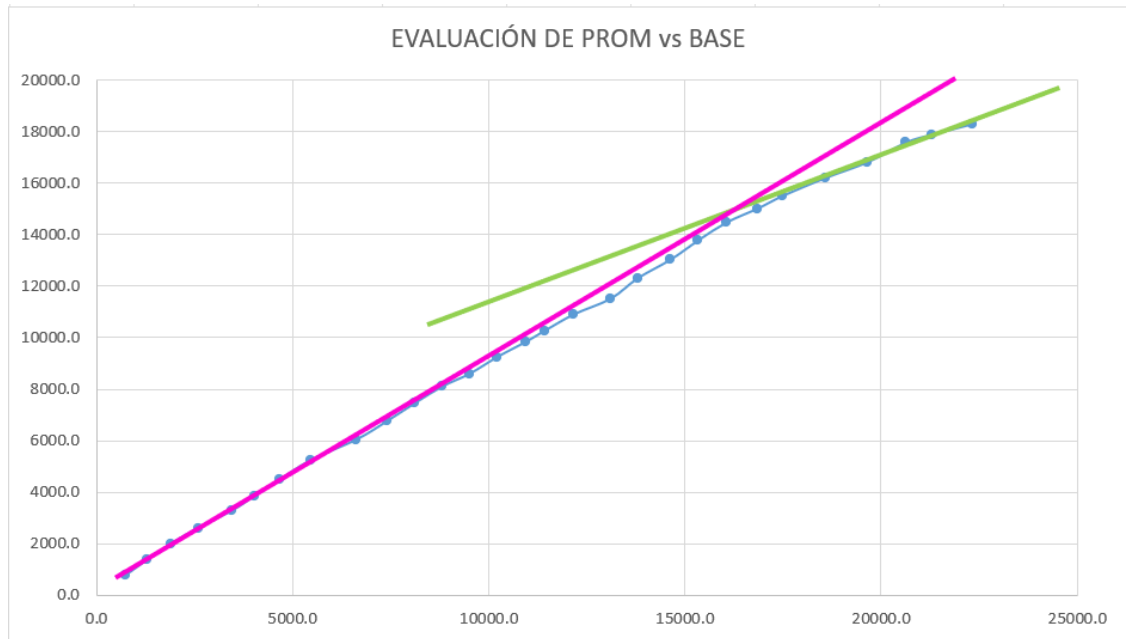
*Nota.* Evaluación de tendencia de datos de cada estación por método de curva de doble masa.

Al evaluarse detalladamente los registros de las estaciones meteorológicas, se pudo constatar que existían inconsistencias en algunas series de datos, lo que hizo

necesaria la aplicación de correcciones. Para ello, se utilizó nuevamente el método de la curva de doble masas, una técnica efectiva para identificar y ajustar discontinuidades en series temporales.

**Figura 26**

*Evaluación por curva de doble masa - estaciones inconsistentes vs estaciones base*



*Nota.* Evaluación por curva de doble masa a las estaciones más inconsistentes vs estaciones base.

El proceso consistió en calcular el factor de conversión, el cual se obtuvo a partir de la relación entre las pendientes de la recta guía o correcta (representada por el comportamiento promedio o por una estación de referencia) y la recta correspondiente a la serie con errores. Específicamente, se dividió la pendiente de la recta guía entre la pendiente de la recta que presentaba la inconsistencia.

**Tabla 13**

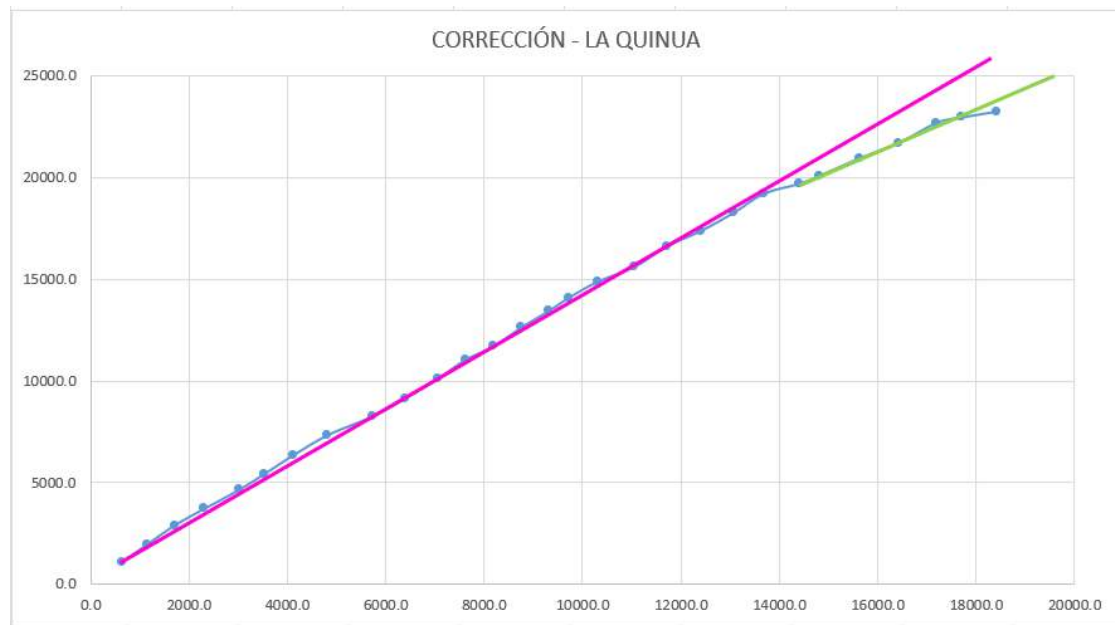
*Cálculo de factor de corrección - La Quinoa*

m1	1.387
m2	0.884
FC	1.569

*Nota.* Cálculo de factor de corrección según la evaluación por curva de doble masa para corrección de datos en estación La Quinoa.

**Figura 27**

*Corrección - La Quinua*



*Nota.* Corrección de datos de estación La Quinua por método de curva de doble masa.

**Tabla 14**

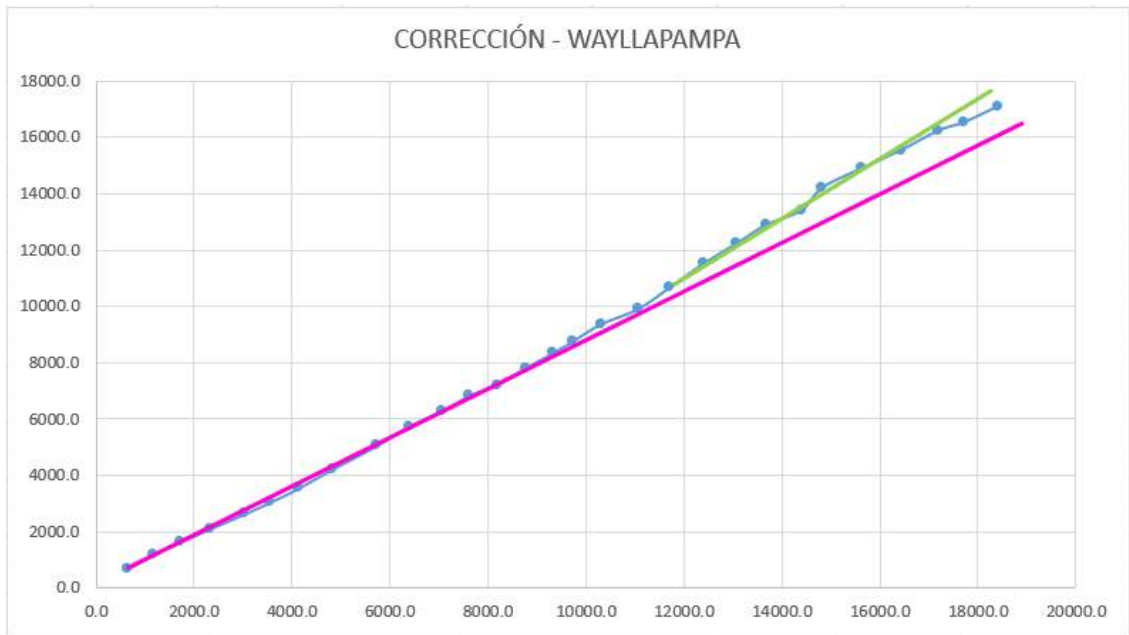
*Cálculo de factor de corrección - Wayllapampa*

m1	0.88536634
m2	1.14977132
FC	0.7700369

*Nota.* Cálculo de factor de corrección según la evaluación por curva de doble masa para corrección de datos en estación Wayllapampa.

**Figura 28**

*Corrección Wayllapampa*



*Nota.* Corrección de datos de estación Wayllapampa por método de curva de doble masa.

Luego, solo los datos identificados como inconsistentes fueron corregidos, aplicando el factor de conversión correspondiente. Este ajuste permitió homogeneizar la serie de datos sin alterar el comportamiento general de las estaciones, manteniendo así la integridad de la información para su uso en los modelos hidrológicos e hidráulicos.

**Tabla 15**

*Datos de estaciones corregidos*

<b>AÑO</b>	<b>EST. LA QUINUA</b>	<b>EST. WAYLLAPAMPA</b>
2011	1006.7	**594.2
2012	767.4	666.2
2013	904.0	543.2
2014	919.1	511.8
2015	**759.6	385.8
2016	636.1	626.3
2017	1355.7	770.9
2018	1174.2	698.1
2019	1551.4	787.6

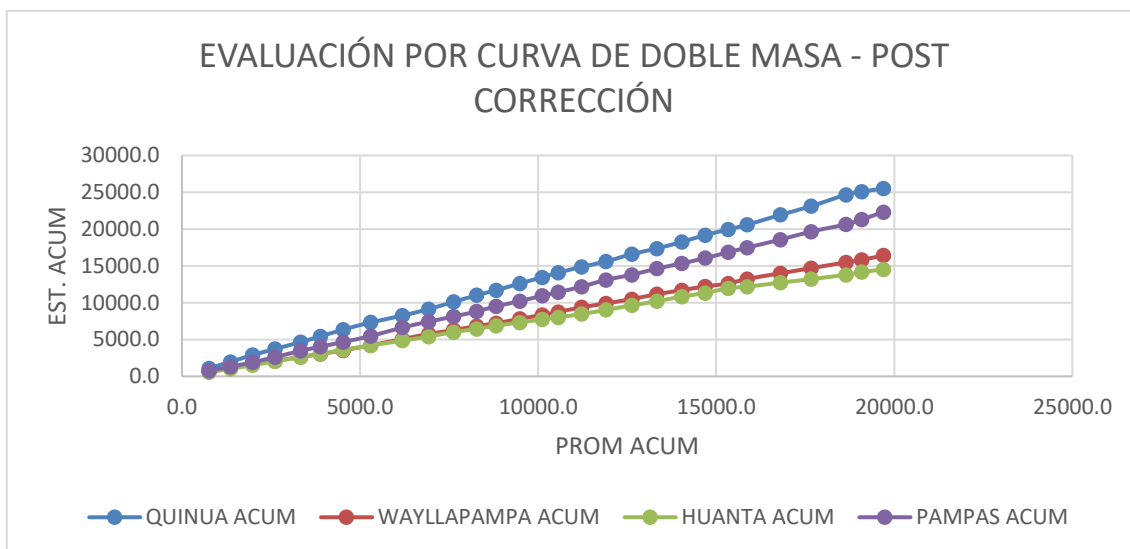
2020	405.9	324.1
2021	445.5	622.4

*Nota.* \*\* en adelante: datos corregidos

Finalmente, se realizó una nueva evaluación de los datos mediante el método de la curva de doble masas, con el objetivo de verificar la efectividad de las correcciones aplicadas. En esta segunda revisión, se observó que las series de datos ya no presentaban inconsistencias significativas, lo que permitió considerar los registros como validados y adecuados para su uso en el análisis posterior.

**Figura 29**

*Evaluación por curva de doble masa - post corrección*



*Nota.* Evaluación final de tendencia de datos de cada estación luego de las correcciones aplicadas.

#### 4.1.6. Cálculo de promedios anuales

Una vez que se contó con la base de datos completa, corregida y validada, se procedió a realizar el cálculo de los promedios anuales de precipitación para cada una de las estaciones meteorológicas consideradas en el estudio. Este paso fue fundamental para obtener una representación precisa del comportamiento pluviométrico en la cuenca, y sirvió como insumo clave para los análisis posteriores de regionalización hidrológica y modelación.

Estos datos validados fueron posteriormente empleados en la elaboración del mapa de interpolación y en la generación de isoyetas, herramientas fundamentales para la caracterización espacial de la precipitación en la cuenca del río Ucusmayo.

**Tabla 16***Promedios anuales para datos corregidos*

<b>AÑO</b>	<b>EST. LA QUINUA</b>	<b>EST. WAYLLAPAMPA</b>	<b>EST. HUANTA</b>	<b>EST. PAMPAS</b>
1993	1085.5	667.4	537.6	735.0
1994	883.0	497.6	485.4	568.0
1995	925.0	460.3	490.3	605.0
1996	818.8	470.5	527.5	693.0
1997	934.2	530.0	552.5	861.0
1998	786.0	410.6	477.3	561.0
1999	895.6	490.2	511.6	636.0
2000	998.9	688.1	608.6	805.0
2001	913.0	839.5	649.6	1169.0
2002	890.4	690.3	559.1	776.2
2003	975.2	532.5	611.5	716.7
2004	918.7	550.4	428.6	683.6
2005	662.3	382.9	439.4	698.0
2006	933.6	590.7	437.8	708.6
2007	825.6	537.7	403.2	727.7
2008	626.4	405.5	290.9	493.9
2009	797.5	631.5	454.2	735
2010	718.5	520.5	556.6	925.6
2011	1006.7	594.2	615.7	692.8
2012	767.4	666.2	556.0	846
2013	904.0	543.2	641.3	703
2014	919.1	511.8	480.5	719.1
2015	759.6	385.8	638.7	794.3
2016	636.1	626.3	227.3	627.4
2017	1355.7	770.9	538.2	1090.8
2018	1174.2	698.1	486.7	1088.6
2019	1551.4	787.6	583.2	971.4
2020	405.9	324.1	362.4	668
2021	445.5	622.4	368.4	1018.4
<b>Promedios</b>	<b>879.8</b>	<b>566.4</b>	<b>500.7</b>	<b>769.6</b>

*Nota.* Presentación de promedio anual de precipitación por cada estación

#### **4.1.7. Cuenca y red hídrica**

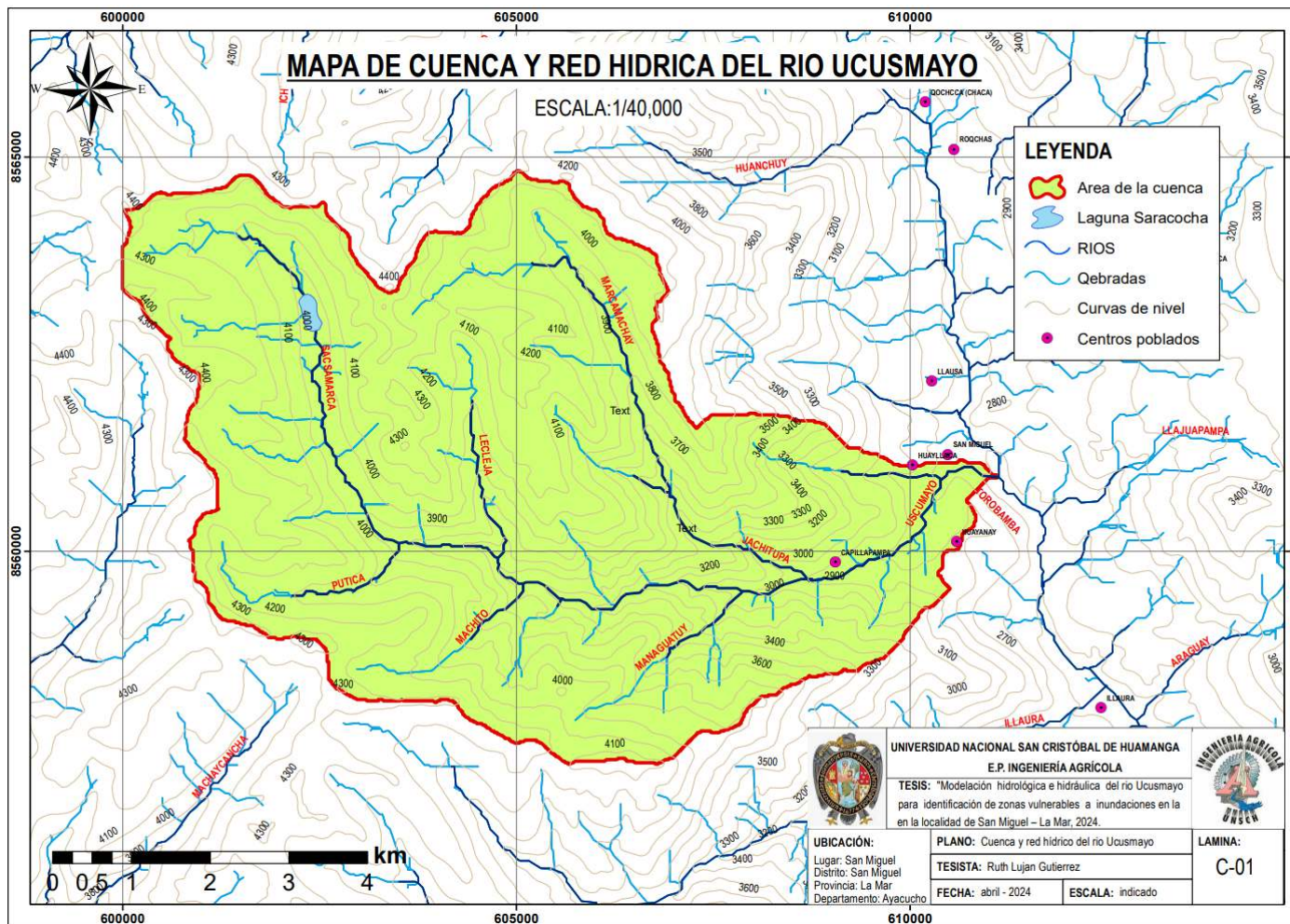
El mapa de cuenca y red hídrica del río Ucusmayo fue elaborado mediante un procesamiento geoespacial en el programa ArcGIS, utilizando principalmente herramientas del módulo Hydrology Tools del complemento Spatial Analyst. Para su desarrollo, se partió de un modelo digital de elevación (DEM), el cual permitió llevar a cabo el análisis del relieve y la red de drenaje natural de la zona de estudio. En primer lugar, se aplicó la herramienta de llenado de depresiones (Fill) para corregir imperfecciones en el terreno digital, seguido de la generación del mapa de dirección de flujo (Flow Direction) y acumulación de flujo (Flow Accumulation), lo cual permitió identificar las rutas preferenciales del escurrimiento superficial.

Con esta información, se delimitó automáticamente la cuenca hidrográfica del río Ucusmayo mediante la herramienta Watershed, a partir de puntos de interés estratégicamente seleccionados. A continuación, se vectorizó la red de drenaje utilizando la herramienta Stream to Feature, la cual traduce las rutas de escurrimiento en líneas geográficas interpretables como ríos y quebradas. Para representar la topografía del área, se generaron curvas de nivel a partir del DEM utilizando la herramienta Contour. Asimismo, se integraron capas vectoriales adicionales, como los centros poblados, que fueron incorporados desde bases de datos geoespaciales externas, y cuerpos de agua como la laguna Saracocha , que se identificaron y representaron como parte del sistema hídrico.

En cuanto a la simbología del mapa, se utilizó un área de color verde claro delimitada con un contorno rojo para representar el perímetro de la cuenca del río Ucusmayo. Los ríos principales se representaron con líneas continuas de color azul oscuro, mientras que las quebradas o cursos de agua menores se mostraron en azul celeste. La laguna Saracocha fue señalada con un símbolo de cuerpo de agua en azul, y los centros poblados se identificaron mediante puntos de color morado. Las curvas de nivel, representadas en líneas marrones, permitieron evidenciar las variaciones altitudinales dentro del área de estudio, facilitando la interpretación del relieve y sus implicancias en la dinámica hidrológica de la cuenca.

**Figura 30**

*Mapa de cuenca y red hídrica del río Ucumayo*



Nota. Mapa de la cuenca y red hídrica del río Ucumayo.

#### **4.1.8. Clasificación del orden de ríos (método Strahler)**

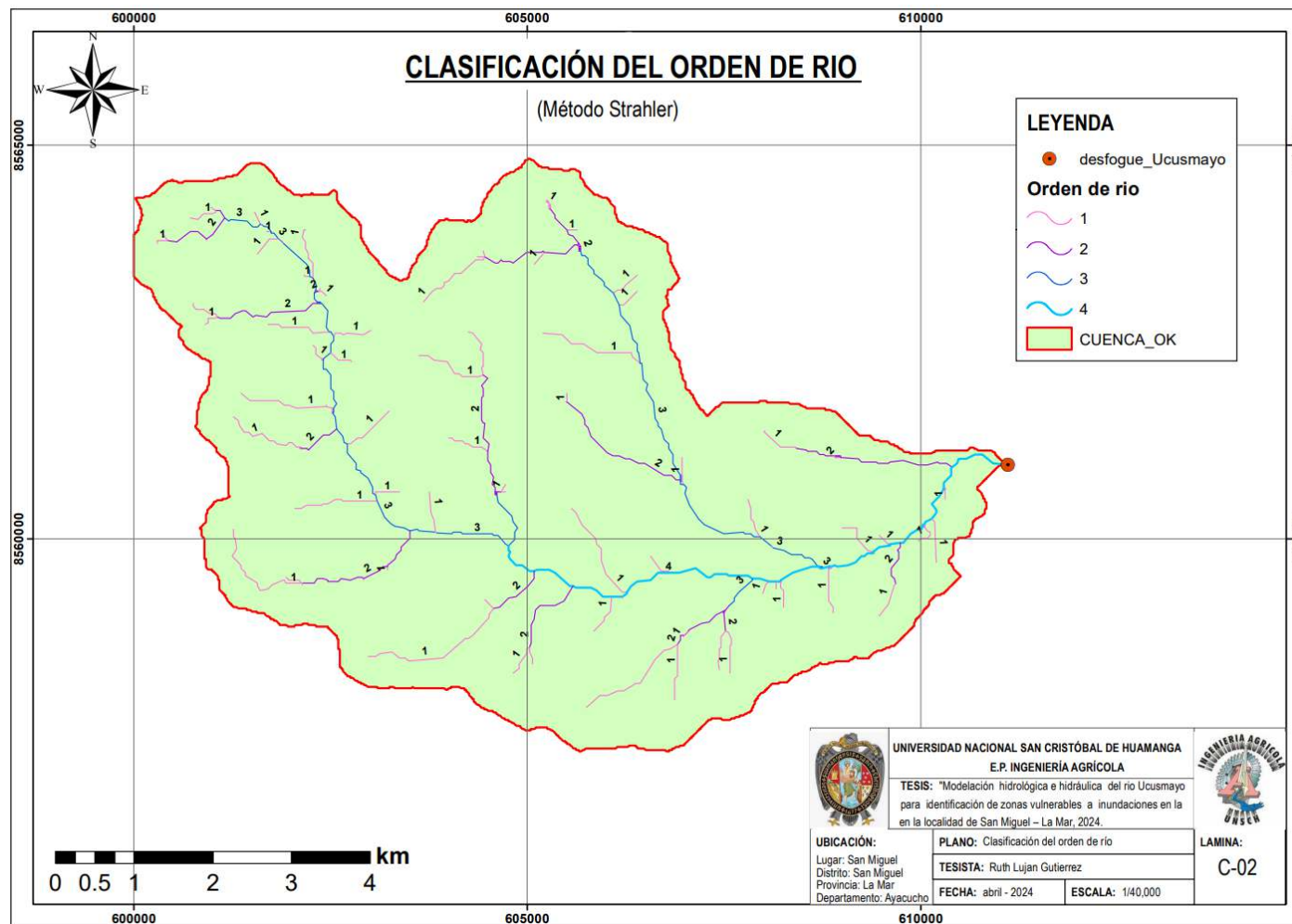
El mapa presentado muestra la clasificación del orden de río en la cuenca del río Ucusmayo, obtenida mediante el método de Strahler, utilizando herramientas del programa ArcGIS. Para su elaboración, inicialmente se procesó un Modelo Digital de Elevación (DEM), a partir del cual se llevaron a cabo diversas operaciones hidrológicas como el llenado de depresiones, la generación de la dirección del flujo y la acumulación de flujo. Estos pasos permitieron definir con precisión la red de drenaje principal y secundaria de la cuenca.

Posteriormente, mediante la herramienta “Stream Order” del conjunto de herramientas de análisis hidrológico, se clasificaron los cursos de agua en función de su jerarquía utilizando el método de Strahler. Este proceso permitió asignar un orden a cada tramo del sistema fluvial, desde los cursos de menor jerarquía (orden 1) hasta los de mayor jerarquía (orden 4), lo que facilita el análisis estructural de la red hidrográfica.

En cuanto a la representación cartográfica, se aplicó una simbología diferenciada por colores para identificar visualmente los distintos órdenes de río. Además, se delimitó la cuenca del río Ucusmayo, la cual se representa con un contorno de color rojo y un relleno verde claro, permitiendo visualizar los límites geográficos del área de estudio. En el extremo este de la cuenca se señala el punto de salida o desfogue del río con un símbolo puntual de color marrón oscuro. La leyenda situada en el extremo derecho del mapa permite interpretar fácilmente los elementos representados, incluyendo los diferentes órdenes de río y el contorno de la cuenca, facilitando así la comprensión del análisis hidrológico realizado.

**Figura 31**

*Clasificación del orden del río*



Nota. Mapa de la clasificación de ríos, resultados con la aplicación del método Strahler.

#### **4.1.9. Modelo digital de elevación**

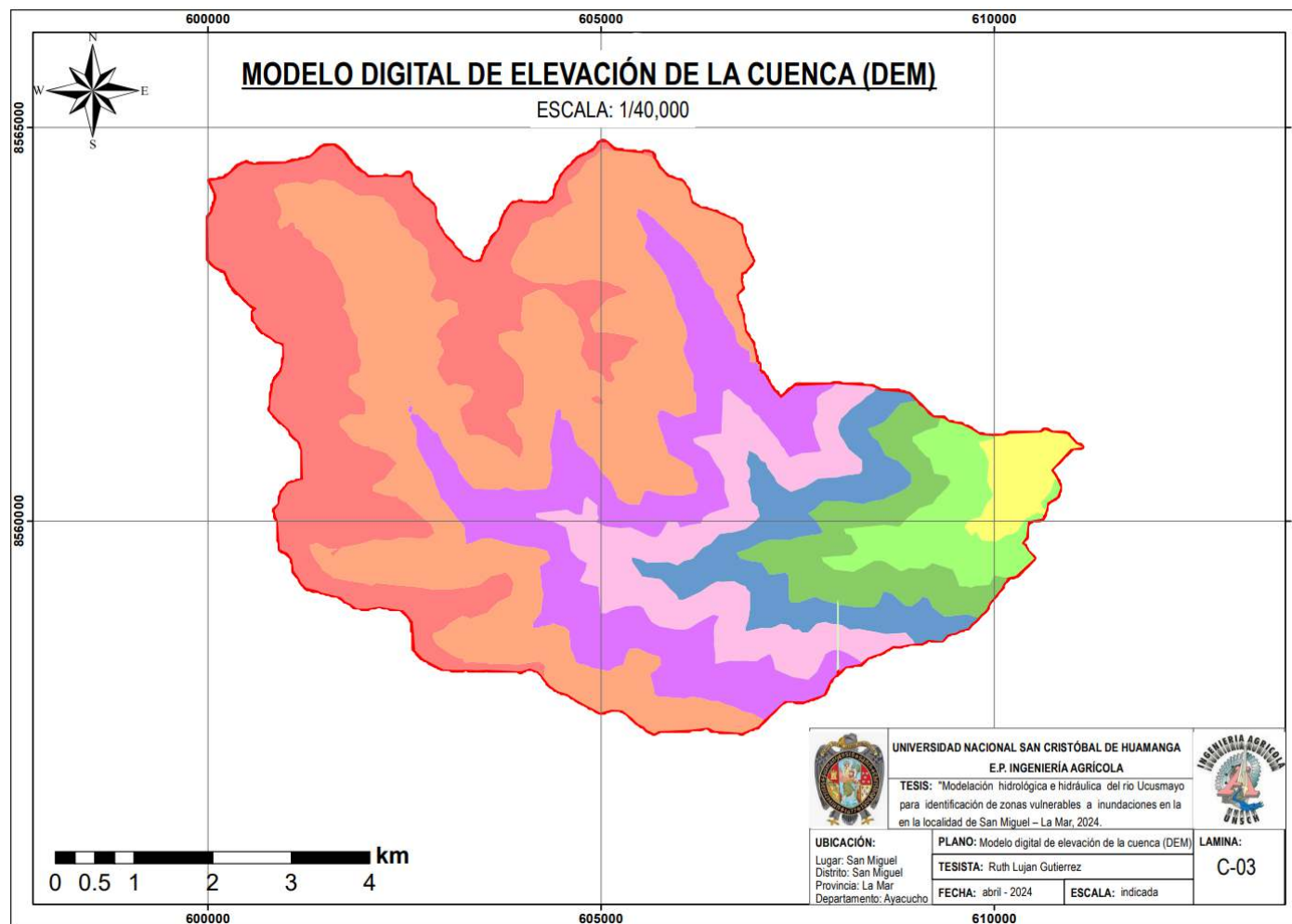
El mapa muestra el Modelo Digital de Elevación (DEM) de la cuenca del río Ucusmayo, representando la división del área en subcuencas o subáreas de contribución hídrica. Para su elaboración en ArcGIS, se partió de un DEM que fue procesado utilizando herramientas hidrológicas disponibles en la caja de herramientas Spatial Analyst. Este modelo permitió generar información sobre el relieve y la dirección del flujo del agua (LandViewer, s. f.).

Una vez procesado el DEM, se aplicaron las funciones de llenado de depresiones y dirección de flujo. A partir de esta información, se generó la acumulación de flujo y, finalmente, se delimitó la red de drenaje. Con base en esta red y en el punto de desfogue previamente definido, se utilizó la herramienta Watershed para segmentar la cuenca en diferentes subcuencas o subáreas de aporte. Estas subáreas se representan mediante una codificación numérica asignada automáticamente (Gridcode), que identifica cada unidad de análisis hidrológico dentro del sistema.

En el mapa, la leyenda muestra que las subáreas están codificadas del 1 al 8 y diferenciadas por colores, lo cual facilita su identificación visual dentro del conjunto de la cuenca. Asimismo, se señala el punto de desfogue del río Ucusmayo mediante un símbolo puntual de color marrón oscuro con un borde rojo, que marca la salida del flujo acumulado de la cuenca. Esta representación es fundamental para posteriores análisis hidrológicos y modelaciones que requieren una comprensión detallada de las áreas de aporte dentro de la cuenca.

**Figura 32**

Modelo digital de elevación de la cuenca (DEM)



Nota. Archivo DEM descargado de Land Viewer <https://eos.com/landviewer/?lat=37.75100&lng=-97.82200&z=11>

#### **4.1.10. Interpolación espacial de la precipitación**

El mapa representa una interpolación de elevaciones dentro de la cuenca del río Ucusmayo, acompañada de curvas de nivel o isoyetas generadas a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM). Para su elaboración, se utilizó el programa ArcGIS, iniciando con el procesamiento del DEM mediante la herramienta Raster Interpolation. En este caso, se aplicó una técnica de interpolación para generar un gradiente continuo de elevaciones, expresado visualmente mediante un degradado de colores.

A partir de esta superficie raster interpolada, se generaron curvas de nivel o isoyetas mediante la herramienta Contour, que permite representar intervalos regulares de elevación. Estas isoyetas se proyectan sobre la superficie de la cuenca, permitiendo visualizar los cambios altitudinales de manera más precisa.

En la leyenda, se observa claramente el contorno rojo que define los límites de la cuenca de estudio, mientras que las isoyetas aparecen como líneas negras con etiquetas numéricas que indican los valores de elevación en metros. El fondo del mapa presenta una rampa de colores que va desde el azul (valores más bajos, 1167.25 m) hasta el rojo (valores más altos, 1447.8 m), lo cual facilita una rápida interpretación visual del relieve. Esta representación es fundamental para entender la morfología del terreno, aspecto clave en cualquier modelación hidrológica.

Como parte final del desarrollo del primer objetivo específico, que consistió en regionalizar la cuenca del río Ucusmayo con fines de caracterización pluviométrica, se elaboró un gráfico de isoyetas. Este gráfico permitió representar espacialmente la distribución de la precipitación anual en la cuenca, mediante la interpolación de datos provenientes de estaciones meteorológicas con registros confiables. Su elaboración fue fundamental para estimar valores aproximados de precipitación en zonas donde no existen registros directos, permitiendo así una mejor comprensión del comportamiento hidrológico de la cuenca.

El análisis de las precipitaciones acumuladas anualmente permitió identificar áreas con diferentes niveles de pluviosidad dentro de la cuenca, lo que constituye un insumo esencial para la modelación hidrológica posterior. Esta información es clave para caracterizar la generación de escorrentía superficial y, en consecuencia, los caudales máximos de avenida que pueden producirse en eventos de lluvia intensa.

**Aplicación:**

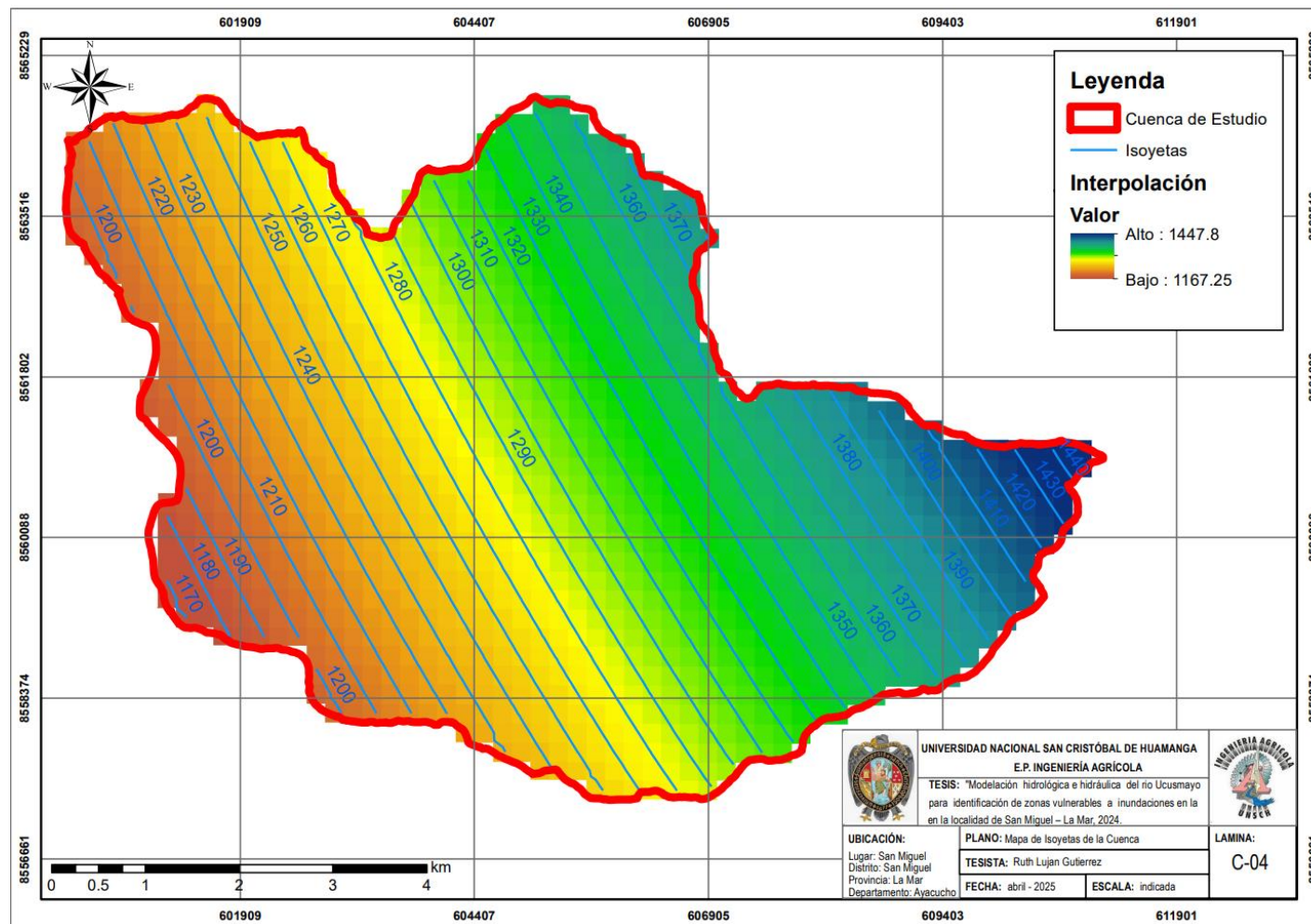
a cuenca del río Ucumayo presenta una distribución variable de la precipitación anual. De acuerdo con el análisis espacial realizado mediante el gráfico de isoyetas, se identificó que las zonas altas y del sector occidental reciben mayores volúmenes de precipitación, con acumulados anuales superiores a los 1,200 milímetros. Estas áreas corresponden principalmente a los alrededores de las estaciones La Quinua y Wayllapampa, que presentaron los registros más altos.

En contraste, las zonas medias y bajas de la cuenca, cercanas al tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucumayo, presentan valores menores de precipitación acumulada, en rangos cercanos a los 700 a 900 milímetros anuales. Esta variabilidad en la distribución pluviométrica tiene implicancias directas en la generación de escorrentía y en la identificación de zonas vulnerables a inundaciones.

Desde un enfoque práctico, el conocimiento de estas diferencias en la precipitación acumulada anual permite orientar decisiones para la gestión de riesgos, el diseño de infraestructuras hidráulicas y la planificación territorial. En particular, las zonas con mayores precipitaciones deben ser consideradas prioritarias en términos de monitoreo y control, ya que son las principales generadoras de escorrentía hacia los sectores más expuestos de la cuenca.

**Figura 33**

*Mapa de interpolación espacial de la precipitación*



*Nota.* Mapa de interpolación espacial de la precipitación en la zona, con fines de estimación de datos en la zona de la cuenca.

Dado a que los valores utilizados en la interpolación, fueron los datos de precipitación mensual total por cada estación meteorológica, se realizó el cálculo simple para estimar valores de precipitaciones máximas diarias a partir de dicha interpolación realizada en el programa ArcGis. Se tienen 30 datos de precipitación en mm, obtenidos de cada una de las 30 regiones aproximadas de la interpolación, dichos datos corresponden a datos generales de precipitación en toda la cuenca. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 17**

*Precipitaciones en la cuenca estimadas a partir de la regionalización*

<b>PPMAX24HR</b>		
37.30	32.40	37.90
36.70	23.00	31.20
35.20	32.70	22.30
29.70	21.10	28.20
37.80	33.20	31.70
43.60	24.60	36.70
28.40	46.80	33.00
26.70	28.50	21.60
28.70	32.10	35.50
27.00	28.70	23.40

*Nota.* Datos de precipitaciones máximas durante 24 horas utilizados para el modelamiento hidrológico, obtenidos de cada una de las regiones del mapa de interpolación espacial.

#### **4.2. Modelado hidrológico – caudales máximos (HEC – HMS)**

Para la estimación de los caudales máximos en la cuenca del río Ucusmayo, se empleó el programa HEC-HMS, una herramienta ampliamente utilizada en hidrología para simular procesos de escorrentía superficial a partir de eventos de precipitación. El modelo requirió como insumos principales las precipitaciones intensas, obtenidas a partir de hietogramas representativos para distintos periodos de retorno: 5, 10, 20, 25, 50, 70, 100, 150, 200, 250 y 500 años. Estos hietogramas reflejaron la distribución temporal de las lluvias durante eventos extremos, permitiendo modelar el comportamiento hidrológico de la cuenca con mayor precisión.

Adicionalmente, se incorporaron parámetros físicos y morfométricos de la cuenca, tales como el área de drenaje, el número de curva (Curve Number – CN), el tiempo de

concentración, el tiempo de retardo (lag time) y el coeficiente de escurritía. Estos parámetros fueron fundamentales para definir la capacidad de infiltración del terreno, el tiempo de respuesta del sistema y la magnitud del escurrimiento superficial generado. Una vez configurado el modelo con la información requerida, se procedió a la simulación de los caudales máximos para cada uno de los periodos de retorno definidos.

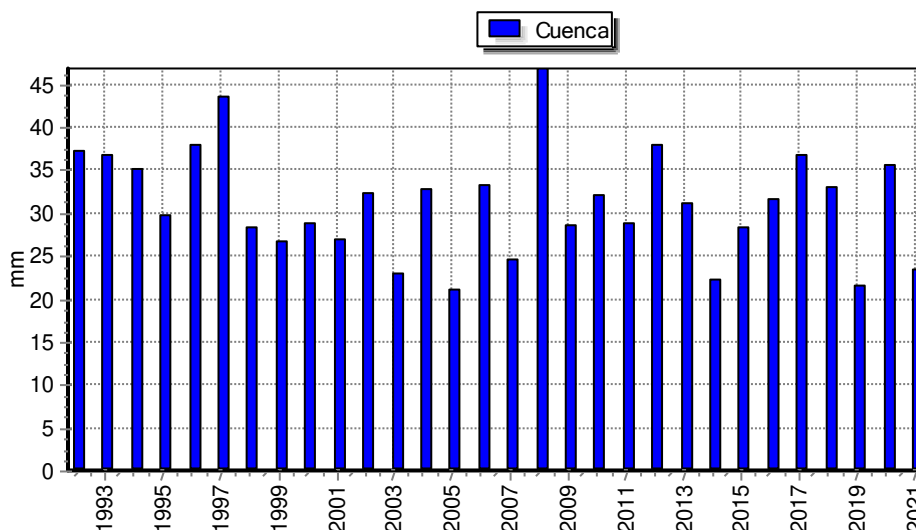
Los detalles del procesamiento de los datos se presentan a continuación.

#### 4.2.1. Cálculo de precipitaciones máximas a diferentes periodos de retorno

Con base en los datos pluviométricos obtenidos mediante el proceso de regionalización hidrológica (ver Figura 33), se calcularon las precipitaciones máximas para los distintos periodos de retorno. Para esta etapa se utilizó el programa Hydrognomon, especializado en análisis estadístico de series hidrológicas. Este programa permitió ajustar las precipitaciones extremas a diferentes funciones de distribución de probabilidad, a fin de seleccionar aquella que ofreciera una mejor representación estadística de los datos observados.

**Figura 34**

*Resultados obtenidos de regionalización*



*Nota.* Precipitaciones máximas obtenidas en regionalización hidrológica

Entre las distribuciones evaluadas se incluyeron: la distribución normal, log-normal, Pearson tipo III, log-Pearson tipo III, Gumbel y Gamma. Cada una de ellas fue sometida a una prueba de bondad de ajuste, específicamente el test de Kolmogórov-Smirnov, una prueba no paramétrica que evalúa la compatibilidad entre la distribución empírica de los datos y la distribución teórica propuesta. Esta evaluación

permitió identificar la función que mejor se ajustaba a la variabilidad y magnitud de los eventos extremos registrados.

**Tabla 18**

*Prueba de bondad de ajuste*

<b>Kolmogorov-Smirnov test</b>	<b>a=1%</b>	<b>a=5%</b>	<b>a=10%</b>	<b>Attained a</b>	<b>DMax</b>
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.03%	0.07299
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.33%	0.07063
<b>Gamma</b>	<b>ACCEPT</b>	<b>ACCEPT</b>	<b>ACCEPT</b>	<b>99.86%</b>	<b>0.06249</b>
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.84%	0.06301
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.55%	0.06823
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	90.19%	0.09667

*Nota.* Prueba de Kolmogorov-Smirnov para distribuciones generalmente utilizadas en precipitaciones y datos meteorológicos

Los resultados obtenidos del test de Kolmogórov-Smirnov se presentan en la Tabla 18, donde se evaluó el ajuste de seis distribuciones de probabilidad a los datos de precipitaciones máximas registradas en la cuenca del río Ucumayo. Todas las distribuciones evaluadas fueron aceptadas en los niveles de significancia del 1%, 5% y 10%, lo que indica que, estadísticamente, pueden representar adecuadamente los datos observados. Sin embargo, al considerar tanto el valor de significancia alcanzado como la magnitud del estadístico DMax, se identificó que la distribución Gamma fue la que presentó el mejor desempeño.

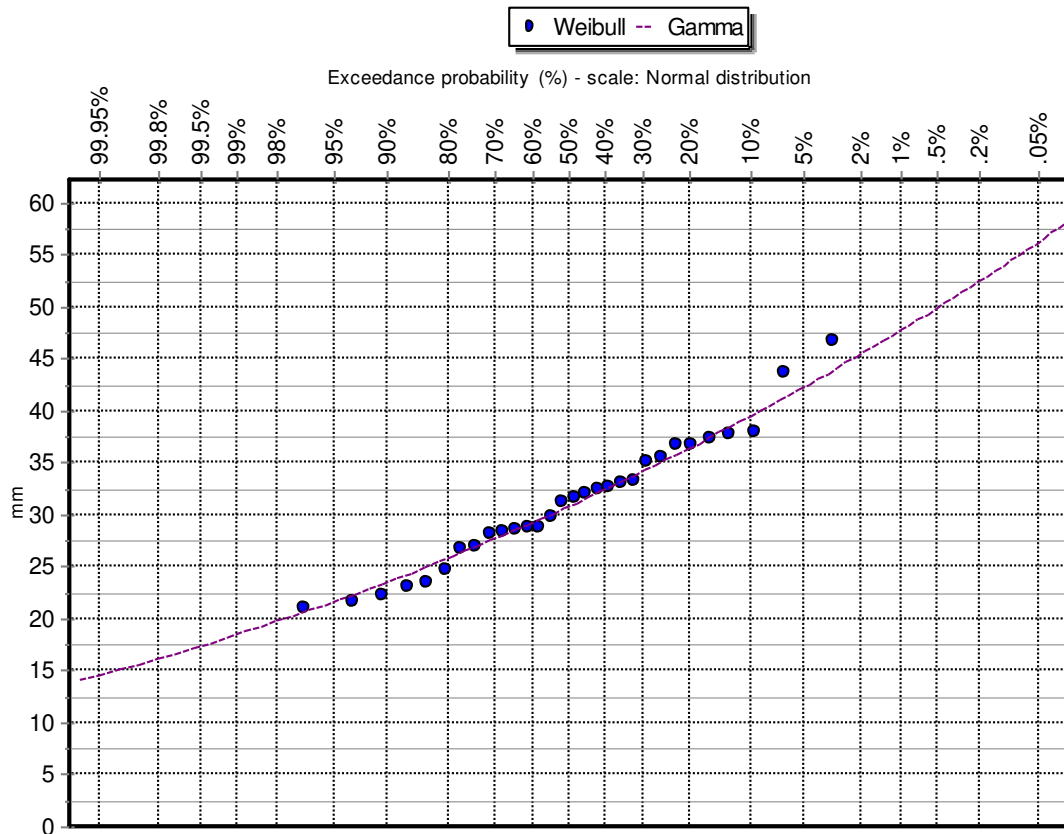
La distribución Gamma obtuvo un nivel de significancia alcanzado del 99.86%, el más alto entre todas las distribuciones evaluadas, y además presentó el menor valor de DMax (0.06249), lo que indica un menor grado de desviación entre la distribución empírica de los datos y la teórica. Este doble criterio —mayor significancia y menor desviación— permitió determinar que la distribución Gamma fue la más óptima para representar los eventos extremos de precipitación en la zona de estudio.

En comparación, otras distribuciones como la Pearson tipo III (99.84%) y la log-Pearson tipo III (99.55%) también mostraron ajustes aceptables, aunque con valores ligeramente inferiores tanto en el nivel de significancia como en el DMax. La distribución EV1-Max (Gumbel), comúnmente utilizada para análisis de precipitaciones extremas, obtuvo el menor porcentaje de significancia (90.19%) y el mayor DMax (0.09667), lo que la ubicó como la menos representativa del comportamiento estadístico de los datos.

La correspondencia visual entre los datos empíricos y la distribución Gamma seleccionada puede observarse en la Figura 35, donde se evidencia la cercanía de los puntos de datos reales a la curva teórica ajustada, lo que reafirma su idoneidad para estimar las precipitaciones máximas asociadas a distintos periodos de retorno en la modelación hidrológica del río Ucumayo.

**Figura 35**

*Resultados pluviométricos con distribución Gamma*



*Nota.* Gráfico de precipitaciones máximas obtenidas de interpolación y distribución de Gamma.

Luego de aplicar la distribución Gamma, se obtienen los siguientes resultados para las precipitaciones máximas en los diferentes periodos de retorno.

**Tabla 19**

*Resultados de distribución de Gamma aplicada a precipitaciones máximas en 24h*

PR	PPmax
T (años)	Z
5	36.3324

10	39.489
20	42.2268
25	43.047
50	45.4525
70	46.5563
100	47.6889
150	48.9356
200	49.7967
250	50.4525
500	52.4298

*Nota.* Datos resultantes de extrapolación Gamma, aplicada a los datos iniciales de precipitaciones máximas durante 24 horas.

#### 4.2.2. Curva de intensidad, duración y frecuencia (IDF)

Con los datos de precipitaciones máximas para los distintos periodos de retorno (5, 10, 20, 25, 50, 70, 100, 150, 200, 250 y 500 años), presentados en la Tabla 20, que incluyeron además la probabilidad de excedencia (1/Año) y la probabilidad de no excedencia (1 – Prob. exced.), se procedió a estimar las precipitaciones correspondientes a cada uno de estos periodos.

**Tabla 20**

*Precipitaciones estimadas con distribución Gamma para diferentes periodos de retorno*

<b>Tiempo (años)</b>	<b>Probabilidad de Excedencia P = F(x)</b>	<b>Probabilidad de no Excedencia 1- F(x)</b>	<b>Z Precipitaciones (mm)</b>
5	0.200	0.800	36.33
10	0.100	0.900	39.49
20	0.050	0.950	42.23
25	0.040	0.960	43.05
50	0.020	0.980	45.45
70	0.014	0.986	46.56
100	0.010	0.990	47.69
150	0.007	0.993	48.94
200	0.005	0.995	49.8
250	0.004	0.996	50.45
500	0.002	0.998	52.43

*Nota.* La tabla muestra los valores de precipitación (mm) obtenidos a partir del ajuste de la distribución Gamma, considerando distintos periodos de retorno.

Mediante la aplicación del método empírico de Dick y Peschke se ajustó los valores de precipitación a partir de la fórmula respectiva que considera la distribución de frecuencias y facilita una representación coherente de los eventos extremos.

$$P_D = P_{24h} \times \left(\frac{D}{1440}\right)^{0.25}$$

Donde:

$P_D$  = precipitación máxima de duración  $D$ , en mm

$P_{24h}$  = precipitación máxima de 24 horas, en mm

$D$  = duración de la precipitación, en horas

Los resultados obtenidos de este proceso se detallan en la Tabla 21.

**Tabla 21***Precipitación en 24 horas (mm) - Dick y Peschke*

<b>Duración (Minutos)</b>	<b>36.33</b>	<b>39.49</b>	<b>42.23</b>	<b>43.05</b>	<b>45.45</b>	<b>46.56</b>	<b>47.69</b>	<b>48.94</b>	<b>49.80</b>	<b>50.45</b>	<b>52.43</b>
	<b>Periodo de Retorno (Años)</b>										
	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>500</b>
<b>Precipitación (mm)</b>											
5	8.82	9.59	10.25	10.45	11.03	11.30	11.58	11.88	12.09	12.25	12.73
10	10.49	11.40	12.19	12.43	13.12	13.44	13.77	14.13	14.38	14.56	15.14
15	11.61	12.62	13.49	13.75	14.52	14.87	15.24	15.63	15.91	16.12	16.75
20	12.47	13.56	14.50	14.78	15.60	15.98	16.37	16.80	17.09	17.32	18.00
25	13.19	14.33	15.33	15.63	16.50	16.90	17.31	17.76	18.08	18.31	19.03
30	13.80	15.00	16.04	16.35	17.27	17.69	18.12	18.59	18.92	19.17	19.92
35	14.35	15.59	16.67	17.00	17.95	18.38	18.83	19.32	19.66	19.92	20.70
40	14.83	16.12	17.24	17.57	18.56	19.01	19.47	19.98	20.33	20.60	21.40
45	15.28	16.60	17.75	18.10	19.11	19.57	20.05	20.57	20.94	21.21	22.04
50	15.68	17.05	18.23	18.58	19.62	20.10	20.59	21.12	21.50	21.78	22.63
55	16.06	17.46	18.67	19.03	20.09	20.58	21.08	21.63	22.01	22.30	23.18
60	16.42	17.84	19.08	19.45	20.54	21.03	21.55	22.11	22.50	22.79	23.69
120	19.52	21.22	22.69	23.13	24.42	25.01	25.62	26.29	26.76	27.11	28.17
180	21.60	23.48	25.11	25.60	27.03	27.68	28.36	29.10	29.61	30.00	31.17
240	23.21	25.23	26.98	27.50	29.04	29.75	30.47	31.27	31.82	32.24	33.50
300	24.55	26.68	28.53	29.08	30.71	31.45	32.22	33.06	33.64	34.09	35.42

360	25.69	27.92	29.86	30.44	32.14	32.92	33.72	34.60	35.21	35.68	37.07
420	26.70	29.02	31.03	31.63	33.40	34.21	35.05	35.96	36.60	37.08	38.53
480	27.61	30.01	32.09	32.71	34.54	35.38	36.24	37.18	37.84	38.34	39.84
540	28.43	30.90	33.04	33.69	35.57	36.43	37.32	38.29	38.97	39.48	41.03
600	29.19	31.73	33.93	34.59	36.52	37.40	38.31	39.32	40.01	40.53	42.12
660	29.89	32.49	34.74	35.42	37.40	38.31	39.24	40.26	40.97	41.51	43.14
720	30.55	33.21	35.51	36.20	38.22	39.15	40.10	41.15	41.87	42.43	44.09
780	31.17	33.88	36.23	36.93	38.99	39.94	40.91	41.98	42.72	43.28	44.98
840	31.75	34.51	36.90	37.62	39.72	40.69	41.68	42.77	43.52	44.09	45.82
900	32.30	35.11	37.55	38.27	40.41	41.40	42.40	43.51	44.28	44.86	46.62
960	32.83	35.68	38.16	38.90	41.07	42.07	43.09	44.22	45.00	45.59	47.38
1020	33.33	36.23	38.74	39.49	41.70	42.71	43.75	44.89	45.68	46.29	48.10
1080	33.81	36.75	39.30	40.06	42.30	43.33	44.38	45.54	46.34	46.95	48.79
1140	34.27	37.25	39.83	40.60	42.87	43.92	44.98	46.16	46.97	47.59	49.46
1200	34.71	37.73	40.35	41.13	43.43	44.48	45.56	46.76	47.58	48.20	50.09
1260	35.14	38.19	40.84	41.63	43.96	45.03	46.12	47.33	48.16	48.80	50.71
1320	35.55	38.64	41.32	42.12	44.47	45.55	46.66	47.88	48.73	49.37	51.30
1380	35.95	39.07	41.78	42.59	44.97	46.06	47.18	48.42	49.27	49.92	51.87
<b>1440</b>	<b>36.33</b>	<b>39.49</b>	<b>42.23</b>	<b>43.05</b>	<b>45.45</b>	<b>46.56</b>	<b>47.69</b>	<b>48.94</b>	<b>49.80</b>	<b>50.45</b>	<b>52.43</b>

*Nota.* Estimación de duración de datos de precipitación a diferentes años de retorno.

Posteriormente, con los valores de precipitación ya estimados, se calculó la intensidad correspondiente para cada periodo de retorno, utilizando la fórmula clásica de intensidad en función del tiempo y la magnitud del evento. Esta etapa permitió transformar las

precipitaciones acumuladas en intensidades, lo cual es fundamental para el desarrollo de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF). Los resultados de dichas intensidades se presentan en la Tabla 22.

$$I = \frac{P_D}{D}$$

Donde:

PD = precipitación máxima de duración D, en mm

D = duración de la precipitación, en horas

**Tabla 22**

*Intensidad de precipitación (mm/hr) para diferentes duraciones y periodos de retorno*

Duración (Horas)	Duración (min)	Periodo de Retorno (Años)										
		5	10	20	25	50	70	100	150	200	250	500
Intensidad (mm/hr)												
0.083	5	105.83	115.03	123.00	125.39	132.40	135.62	138.92	142.55	145.06	146.97	152.73
0.167	10	62.93	68.40	73.14	74.56	78.73	80.64	82.60	84.76	86.25	87.39	90.81
0.250	15	46.43	50.46	53.96	55.01	58.08	59.49	60.94	62.53	63.63	64.47	67.00
0.333	20	37.42	40.67	43.49	44.33	46.81	47.95	49.11	50.40	51.28	51.96	54.00
0.417	25	31.65	34.40	36.79	37.50	39.60	40.56	41.55	42.63	43.38	43.95	45.68
0.500	30	27.61	30.01	32.09	32.71	34.54	35.38	36.24	37.18	37.84	38.34	39.84
0.583	35	24.59	26.73	28.58	29.14	30.77	31.51	32.28	33.12	33.71	34.15	35.49
0.667	40	22.25	24.18	25.86	26.36	27.83	28.51	29.20	29.97	30.49	30.90	32.11
0.750	45	20.37	22.14	23.67	24.13	25.48	26.10	26.73	27.43	27.92	28.28	29.39

---

0.833	50	18.82	20.46	21.87	22.30	23.54	24.12	24.70	25.35	25.79	26.13	27.16
0.917	55	17.52	19.04	20.36	20.76	21.92	22.45	23.00	23.60	24.02	24.33	25.29
1	60	16.42	17.84	19.08	19.45	20.54	21.03	21.55	22.11	22.50	22.79	23.69
2	120	9.76	10.61	11.34	11.56	12.21	12.51	12.81	13.15	13.38	13.55	14.08
3	180	7.20	7.83	8.37	8.53	9.01	9.23	9.45	9.70	9.87	10.00	10.39
4	240	5.80	6.31	6.75	6.88	7.26	7.44	7.62	7.82	7.95	8.06	8.37
5	300	4.91	5.34	5.71	5.82	6.14	6.29	6.44	6.61	6.73	6.82	7.08
6	360	4.28	4.65	4.98	5.07	5.36	5.49	5.62	5.77	5.87	5.95	6.18
7	420	3.81	4.15	4.43	4.52	4.77	4.89	5.01	5.14	5.23	5.30	5.50
8	480	3.45	3.75	4.01	4.09	4.32	4.42	4.53	4.65	4.73	4.79	4.98
9	540	3.16	3.43	3.67	3.74	3.95	4.05	4.15	4.25	4.33	4.39	4.56
10	600	2.92	3.17	3.39	3.46	3.65	3.74	3.83	3.93	4.00	4.05	4.21
11	660	2.72	2.95	3.16	3.22	3.40	3.48	3.57	3.66	3.72	3.77	3.92
12	720	2.55	2.77	2.96	3.02	3.19	3.26	3.34	3.43	3.49	3.54	3.67
13	780	2.40	2.61	2.79	2.84	3.00	3.07	3.15	3.23	3.29	3.33	3.46
14	840	2.27	2.47	2.64	2.69	2.84	2.91	2.98	3.05	3.11	3.15	3.27
15	900	2.15	2.34	2.50	2.55	2.69	2.76	2.83	2.90	2.95	2.99	3.11
16	960	2.05	2.23	2.38	2.43	2.57	2.63	2.69	2.76	2.81	2.85	2.96
17	1020	1.96	2.13	2.28	2.32	2.45	2.51	2.57	2.64	2.69	2.72	2.83
18	1080	1.88	2.04	2.18	2.23	2.35	2.41	2.47	2.53	2.57	2.61	2.71
19	1140	1.80	1.96	2.10	2.14	2.26	2.31	2.37	2.43	2.47	2.50	2.60
20	1200	1.74	1.89	2.02	2.06	2.17	2.22	2.28	2.34	2.38	2.41	2.50

---

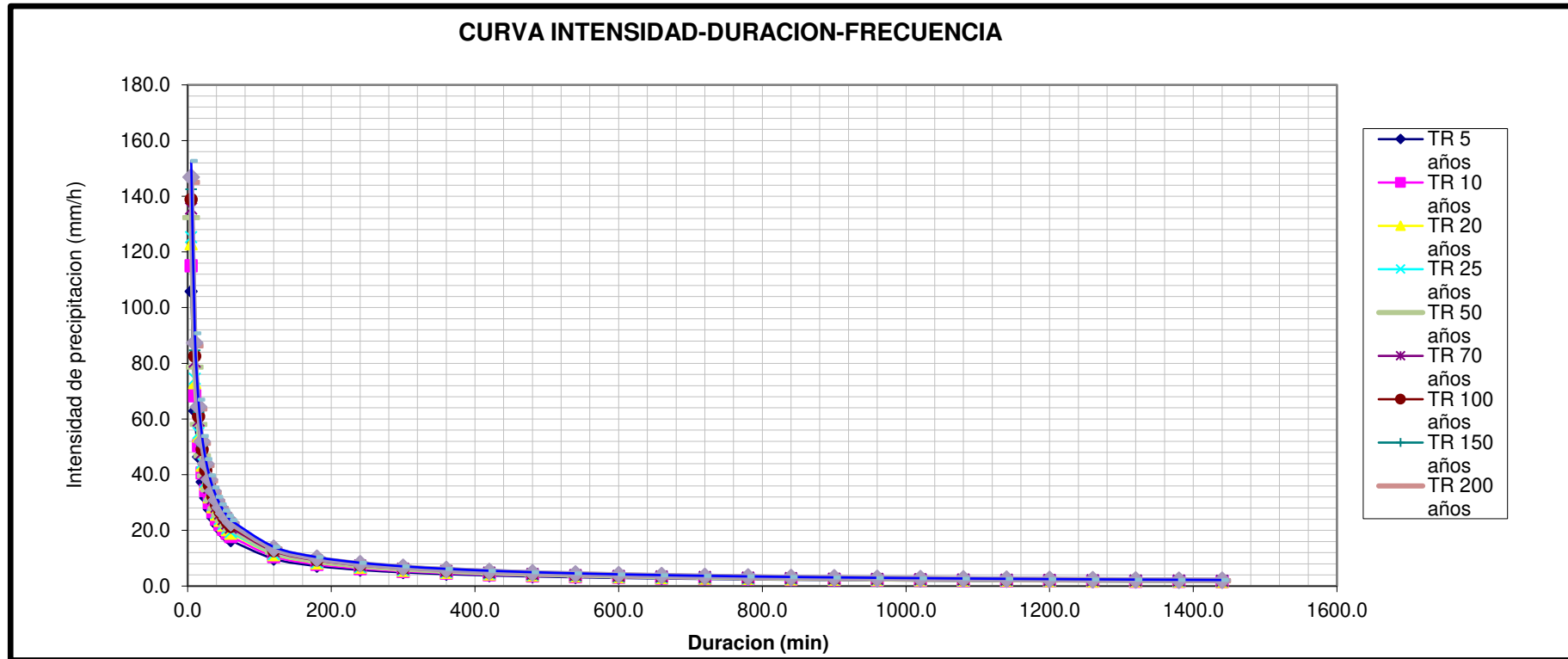
21	1260	1.67	1.82	1.94	1.98	2.09	2.14	2.20	2.25	2.29	2.32	2.41
22	1320	1.62	1.76	1.88	1.91	2.02	2.07	2.12	2.18	2.21	2.24	2.33
23	1380	1.56	1.70	1.82	1.85	1.96	2.00	2.05	2.11	2.14	2.17	2.26
24	1440	1.51	1.65	1.76	1.79	1.89	1.94	1.99	2.04	2.07	2.10	2.18

*Nota.* Estimación de intensidad de datos de precipitación a diferentes años de retorno utilizando el método de Dick y Peschke

Con los datos procesados, se construyó la curva IDF, mostrada en la Figura 36. Esta gráfica proporcionó una representación visual clara del comportamiento de las lluvias intensas en la cuenca del río Ucusmayo, permitiendo inferir con mayor precisión los niveles de amenaza asociados a diferentes escenarios de precipitación. Estas curvas también sirvieron de base para simular distintos eventos extremos en el modelo hidrológico, aportando coherencia técnica al análisis de riesgo de inundación.

**Figura 36**

*Curva de intensidad - duración - frecuencia (IDF)*



*Nota.* Construcción de curva de intensidad, duración y frecuencia: curva IDF.

Posteriormente, se generó el **hietograma de diseño** para cada uno de los periodos de retorno, el cual representa cómo se distribuye la lluvia a lo largo de un evento de 24 horas. Para ello, se aplicó el **método de bloques alternos**, técnica recomendada por instituciones hidrológicas internacionales como el U.S. Soil Conservation Service (SCS), debido a su capacidad para reflejar la variabilidad temporal de las lluvias intensas.

**Tabla 23***Análisis de varianza*

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	114.64039	57.320193	4091308.6	0
Residuos	382	0.0053519	1.401E-05		
Total	384	114.64574			

*Nota.* Análisis de varianza de datos para construcción de ecuación para modelamiento.

**Tabla 24***Resultados de análisis*

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico</i>		<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
			<i>t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>95%</i>	<i>95%</i>	<i>95.0%</i>	<i>95.0%</i>
Intercepción	2.5245923	0.0008141	3101.1385	0	2.5229917	2.526193	2.5229917	2.526193
			-		-	-	-	-
Variable X 1	-0.75	0.0002631	2850.1767	0	0.7505174	0.7494826	0.7505174	0.7494826
Variable X 2	0.0697346	0.0002868	243.1254	0	0.0691706	0.0702985	0.0691706	0.0702985

*Nota.* Resultados de análisis para construcción de ecuación.

**Tabla 25***Análisis de regresión múltiple*

Coeficiente de correlación múltiple	0.9999767
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.9999533
R <sup>2</sup> ajustado	0.9999531
Error típico	0.003743
Observaciones	385

*Nota.* Resultados de análisis de regresión múltiple.

A partir del análisis de regresión múltiple se obtuvo una ecuación ajustada que permite estimar la intensidad máxima de lluvia ( $I_{max}$ ) en función del periodo de retorno (T) y de la duración del evento (D). Este modelo representa matemáticamente el comportamiento temporal de las precipitaciones extremas y constituye una herramienta fundamental para el diseño hidrológico. Esta ecuación constituye la base para la construcción de los hietogramas de diseño, ya que permite calcular la intensidad correspondiente a distintos escenarios de duración y probabilidad de ocurrencia de las lluvias extremas. La ecuación general adoptada presenta la forma:

$$I_{max} = \frac{K \times T^m}{D^n}$$

Donde:

$I_{max}$  = intensidad máxima de lluvia, en mm/hr

T = periodo de retorno, en años

D = duración, en minutos

$$I = \frac{334.651 \times T^{0.0697}}{D^{0.750}}$$

Con dicha ecuación se generó el hietograma correspondiente, por método de bloques alternos, a cada uno de los periodos de retorno considerados, cuyos resultados finales se muestran en la Tabla 26.

**Tabla 26**

*Coeficientes de precipitación para diferentes tiempos de retorno según el modelo de Dyck y Peschke*

<b>Coeficiente de precipitación - Modelo Dyck y Peschke</b>											
<b>Duración</b>	<b>Tr = 5</b>	<b>Tr = 10</b>	<b>Tr = 20</b>	<b>Tr = 25</b>	<b>Tr = 50</b>	<b>Tr = 70</b>	<b>Tr = 100</b>	<b>Tr = 150</b>	<b>Tr = 200</b>	<b>Tr = 250</b>	<b>Tr = 500</b>
años	años	años	años	años	años	años	años	años	años	años	años
60	0.41	0.43	0.45	0.46	0.48	0.49	0.50	0.52	0.53	0.53	0.56
120	0.43	0.46	0.48	0.49	0.51	0.52	0.54	0.55	0.56	0.57	0.60
180	0.47	0.49	0.52	0.52	0.55	0.56	0.58	0.59	0.61	0.61	0.65
240	0.51	0.53	0.56	0.57	0.60	0.61	0.63	0.64	0.66	0.67	0.70
300	0.56	0.58	0.61	0.62	0.65	0.67	0.69	0.70	0.72	0.73	0.77
360	0.62	0.65	0.68	0.69	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.81	0.85
420	0.70	0.73	0.77	0.78	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.91	0.96
480	0.80	0.84	0.88	0.90	0.94	0.97	0.99	1.02	1.04	1.05	1.11
540	0.96	1.01	1.06	1.07	1.13	1.15	1.18	1.22	1.24	1.26	1.32
600	1.21	1.27	1.33	1.35	1.42	1.46	1.49	1.54	1.57	1.59	1.67
660	1.70	1.79	1.88	1.91	2.00	2.05	2.10	2.16	2.20	2.24	2.35
720	3.29	3.45	3.62	3.68	3.86	3.95	4.05	4.17	4.25	4.32	4.53

780	17.37	18.23	19.13	19.43	20.39	20.88	21.40	22.02	22.46	22.81	23.94
840	2.20	2.31	2.43	2.46	2.59	2.65	2.72	2.79	2.85	2.89	3.04
900	1.41	1.48	1.55	1.58	1.65	1.69	1.74	1.79	1.82	1.85	1.94
960	1.07	1.12	1.18	1.19	1.25	1.28	1.32	1.35	1.38	1.40	1.47
1020	0.87	0.92	0.96	0.98	1.02	1.05	1.08	1.11	1.13	1.15	1.20
1080	0.74	0.78	0.82	0.83	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.03
1140	0.65	0.69	0.72	0.73	0.77	0.79	0.81	0.83	0.84	0.86	0.90
1200	0.58	0.61	0.64	0.65	0.69	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.81
1260	0.53	0.56	0.58	0.59	0.62	0.64	0.65	0.67	0.69	0.70	0.73
1320	0.49	0.51	0.54	0.54	0.57	0.59	0.60	0.62	0.63	0.64	0.67
1380	0.45	0.47	0.50	0.50	0.53	0.54	0.56	0.57	0.58	0.59	0.62
1440	0.42	0.44	0.46	0.47	0.49	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.58

*Nota.* La tabla presenta los coeficientes adimensionales de distribución de la precipitación estimados con el modelo de Dyck y Peschke, considerando distintos periodos de retorno.

#### 4.2.1. Parámetros de la cuenca para modelamiento

En lo que respecta a los parámetros de la cuenca, se realizó la estimación de los principales parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica, utilizando el programa QGIS, a partir de un modelo digital de elevación (DEM). Esta etapa fue crucial para caracterizar el comportamiento hidrológico de la cuenca, ya que estos parámetros permiten determinar su capacidad de respuesta frente a eventos de lluvia intensa. En la tabla siguiente se resumen los principales parámetros obtenidos y su interpretación hidrológica:

**Tabla 27**

*Parámetros de la cuenca*

Parámetro	Value	Unit	Interpretación
Área de la Cuenca (A)	49.2758	km <sup>2</sup>	Cuenca pequeña
Perímetro (P)	35.1368	km	Perímetro de la cuenca
Longitud de la Cuenca (Lb)	11.5414	km	Longitud de la cuenca
Ancho de la Cuenca (B)	4.2695	km	Ancho de la cuenca
Relieve (H)	655,35	m	Relieve muy alto, indicando terreno montañoso
Tiempo de Concentración - Kirpich (Tc)	0.7047	hours	Tiempo de concentración muy corto, indicando respuesta rápida a la lluvia
Pendiente Media de la Cuenca (grados)	16.0257	degrees	Pendiente empinada
Pendiente Media de la Cuenca (porcentaje)	28.7231	%	Pendiente empinada
Pendiente del Canal Principal (Puntos de Inicio y Fin)	13.1799	%	Pendiente muy empinada
Pendiente Compensada del Canal	-0.0511	m/m	Pendiente compensada calculada del canal utilizando regresión lineal
Pendiente Compensada del Canal (%)	-5.1112	%	Pendiente compensada muy suave

*Nota.* Parámetros de la cuenca de estudio obtenidos del procesamiento en Qgis

Entre los datos obtenidos se encuentran el área, el perímetro, la longitud del cauce principal, el ancho medio, el relieve, y diversos indicadores de pendiente. La cuenca

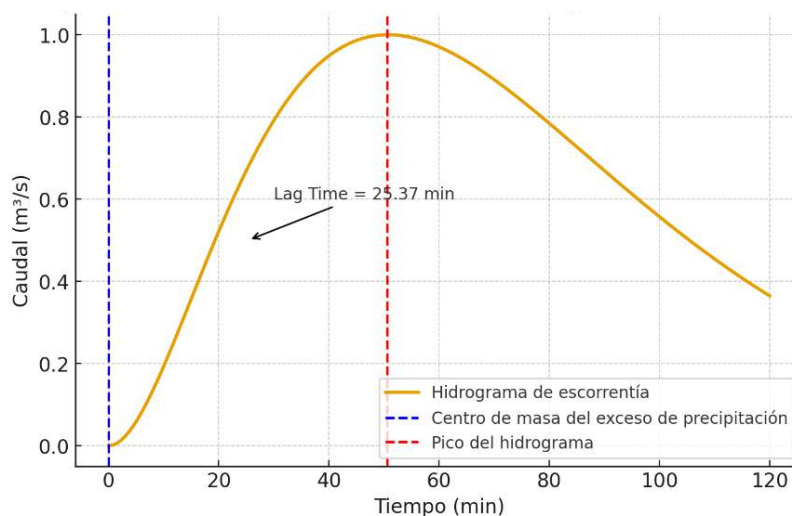
presentó un área de 49.28 km<sup>2</sup>, lo que la clasifica como una cuenca pequeña, generalmente asociada a una rápida concentración de escorrentía. El perímetro de 35.14 km y la longitud del cauce principal de 11.54 km indicaron una geometría relativamente alargada, lo que influye directamente en el tiempo de respuesta hidrológica.

Destaca el valor del relieve, que alcanzó 655,35 m, lo cual es característico de una cuenca de topografía montañosa. Este parámetro, junto con las pendientes medias elevadas (16.03° o 28.72 %), evidencia un terreno abrupto en el que el agua precipitada se desplaza con rapidez hacia el cauce principal por otro lado el resto de parámetros también fue coherente con una topografía montañosa, como lo evidencian las pendientes medias elevadas: 16.03° o 28.72 %, lo cual indica que el agua precipitada se desplaza rápidamente hacia el cauce principal.

El tiempo de concentración (Tc) fue estimado mediante la fórmula de Kirpich, obteniéndose un valor de 0.7047 horas (aproximadamente 42 minutos), lo que confirma la alta capacidad de respuesta de la cuenca ante eventos de lluvia intensa. A partir de este valor, se calculó el tiempo de retardo (Lag Time), aplicando la relación estándar del 60 % del Tc, obteniendo así un Lag Time de 25.37 minutos. Este parámetro representa el intervalo entre el centro de masa del exceso de precipitación y el pico del hidrograma de escorrentía, siendo clave para la modelación hidrológica.

### Figura 37

Representación del Lag Time en el hidrograma de escorrentía



*Nota.* Se presentará en el gráfico el tiempo de retardo, la representación entre caudales máximos y tiempo en minutos

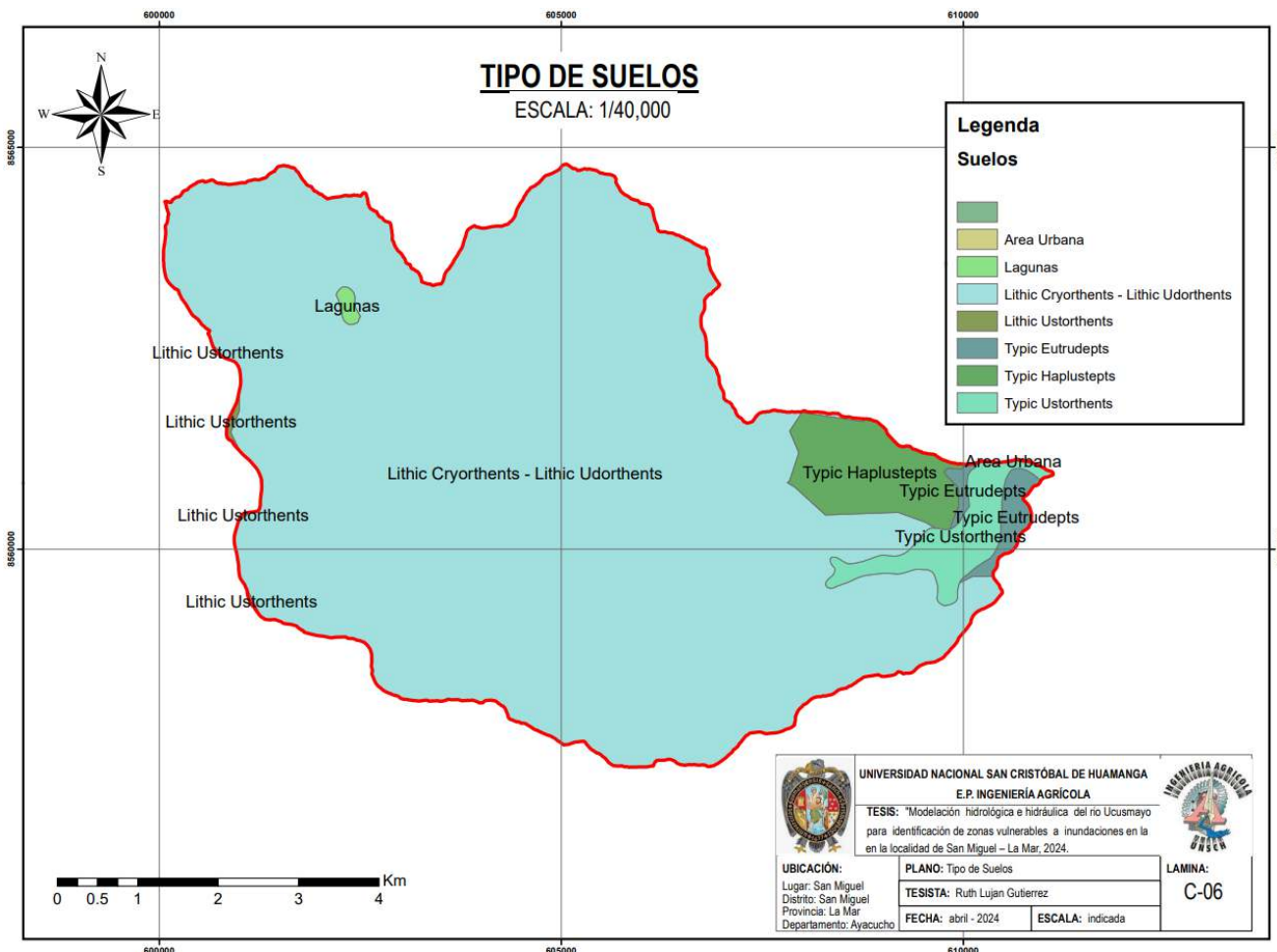
#### **4.2.2. Número de Curva**

Para la estimación del número de curva o CN (Curve Number), se consideró la combinación del tipo de suelo y el uso de suelo presente en la cuenca, de acuerdo con los lineamientos establecidos por el Soil Conservation Service (SCS), actualmente el NRCS del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). El número de curva es un parámetro fundamental en la estimación del escurrimiento superficial en eventos de lluvia, dentro del modelo hidrológico SCS-CN.

Según el análisis del mapa edafológico (Figura 38), elaborado a partir de los archivos del geoportal del Ministerio del Ambiente (*MINAM*, s. f.), el suelo predominante en la cuenca es el Lithic Cryorthents – Lithic Udorthents, caracterizado por suelos superficiales, pedregosos, de rápido drenaje, típicos de zonas montañosas frías. Estos suelos presentan una capacidad de infiltración moderada a baja debido a su escasa profundidad y textura gruesa.

**Figura 38**

*Mapa de tipos de suelo en cuenca*



*Nota.* Elaborado a partir de la Zonificación Económica Ecológica (ZEE) de Ayacucho. Fuente: Ministerio del Ambiente [MINAM], s. f. <https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/ayacucho/>

Dado su comportamiento frente al escurrimiento, este tipo de suelo se clasifica dentro del Grupo Hidrológico C, lo que implica una infiltración moderadamente baja y una respuesta rápida al escurrimiento superficial, especialmente en pendientes altas como las observadas en esta cuenca.

El Grupo Hidrológico C fue entonces asignado a la mayoría de la cuenca, ya que estos suelos abarcan aproximadamente 45.29 km<sup>2</sup> de los 49.28 km<sup>2</sup> totales.

**Tabla 28**

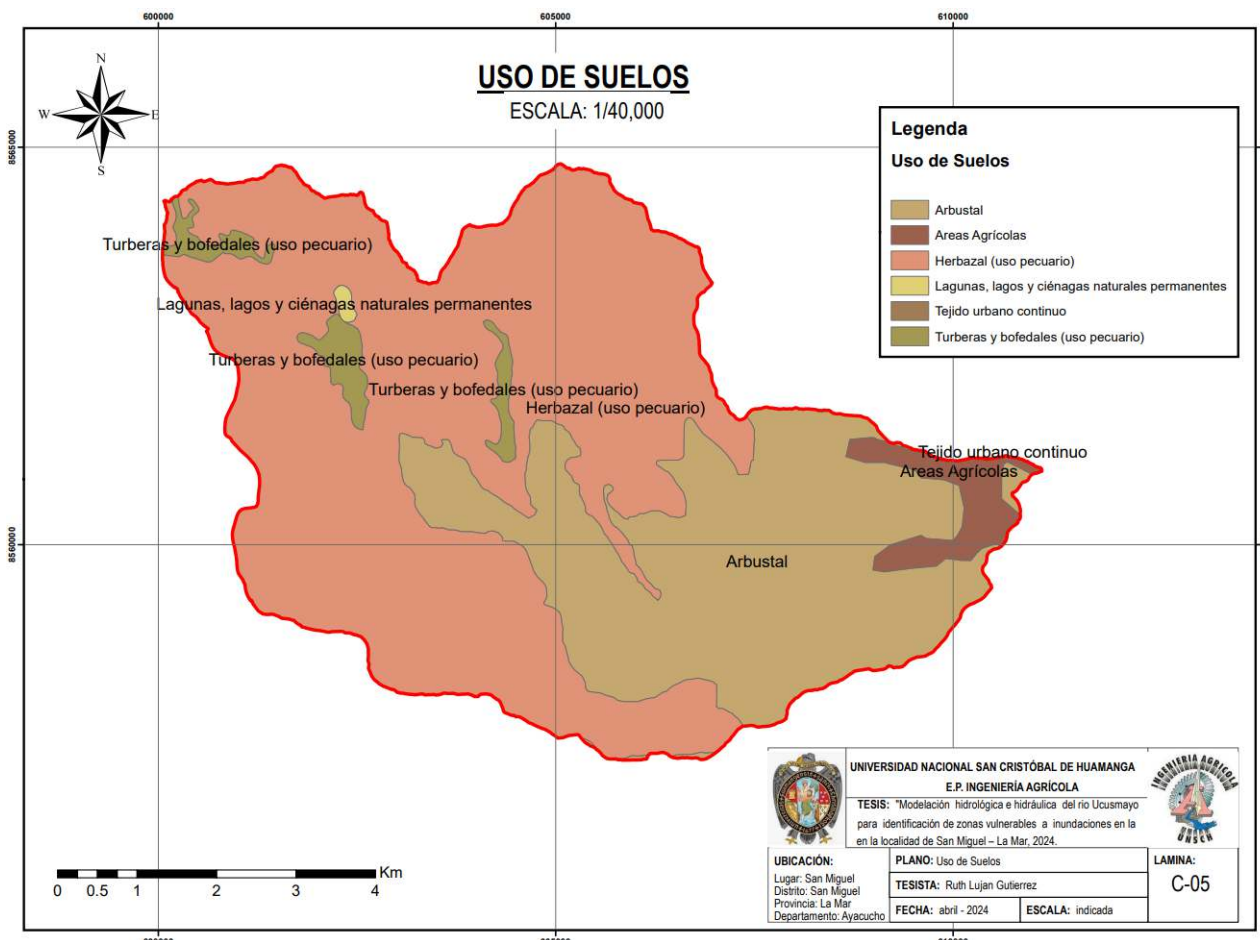
*Valores de CN para usos de suelos en Grupo C*

<b>Uso del suelo</b>	<b>CN (Grupo C)</b>
Pastizal natural	74
Bosque en buena condición	70
Agricultura sin conservación	85
Área urbana	89–92
Turberas / humedales	100

*Nota.* Números de curva del grupo C según clasificación de valores de CN del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)

**Figura 39**

*Mapa de uso de suelos*



Nota. Elaborado a partir de la Zonificación Económica Ecológica (ZEE) de Ayacucho. Fuente: Ministerio del Ambiente [MINAM], s. f. <https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/ayacucho/>

En cuanto al uso del suelo, se evaluó el mapa de coberturas (Figura 39), donde se identificaron principalmente las siguientes categorías:

**Tabla 29**

*Áreas de uso de suelos*

<b>Uso del Suelo</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Descripción</b>
<b>Herbazal</b>	30	Uso pecuario (pastoreo)
<b>Arbustal</b>	16	Pastoreo andino + aprovechamiento de arbustos
<b>Otros</b>	~3.28	Diversos (urbano, lagunas, etc.), menos del 7% del total

*Nota.* Evaluación e identificación de tipo de suelo predominante en la zona de la cuenca.

En base a la clasificación del **Grupo Hidrológico C**, y tomando como referencia el manual TR-55 del SCS (USDA), se asignaron valores de número de curva según el tipo de cobertura, tal como se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla 30**

*Número de curva para cada uso de suelo*

<b>Uso del Suelo</b>	<b>CN (Grupo C)</b>	<b>Fuente / Justificación</b>
<b>Herbazal (pastoreo)</b>	74	Similar a "Pastizal natural, condición regular" (SCS TR-55)
<b>Arbustal</b>	71	Similar a "Bosque abierto o matorral en condición media"
<b>Otros</b>	85 (promedio)	Se estima un promedio entre usos menores (urbano, humedales, etc.)

*Nota.* Número de curva según cada uso del suelo en la zona de la cuenca.

Para obtener el número de curva ponderado representativo de toda la cuenca, se aplicó la fórmula:

$$CN_{\text{prom}} = \frac{\sum(\text{área}_i \cdot CN_i)}{\sum \text{área}_i}$$

$$CN_{\text{prom}} = \frac{(30 \cdot 74) + (16 \cdot 71) + (3.2758 \cdot 85)}{49.2758}$$

$$CN_{\text{prom}} = \frac{2220 + 1136 + 278.44}{49.2758}$$

$$CN_{\text{prom}} = \frac{3634.44}{49.2758} \approx \boxed{73.76}$$

Redondeando el resultado, se obtuvo un CN ponderado igual a 74 para la cuenca. Este valor será utilizado en la estimación del escurrimiento superficial mediante el método SCS, especialmente para la simulación de eventos de diseño en el programa HEC-HMS. Un CN de 74 indica una cuenca con capacidad de infiltración moderadamente baja, donde una parte significativa de la precipitación generará escorrentía superficial, sobre todo en eventos de alta intensidad.

Se tuvo también en cuenta la abstracción inicial ( $I_a$ ), el cual es un parámetro esencial dentro del modelo de escorrentía SCS-CN (Soil Conservation Service - Curve Number), ya que representa las pérdidas iniciales de agua que ocurren antes de que comience la escorrentía superficial. Estas pérdidas incluyen la intercepción por la vegetación, infiltración inicial del suelo y almacenamiento en depresiones superficiales.

El cálculo de la abstracción inicial se realiza a partir del número de curva (CN) mediante la siguiente expresión empírica:

$$I_a = 0.2 \times S$$

Donde S es el almacenamiento potencial de agua del suelo, y se calcula con la fórmula:

$$S = (25400/CN) - 254$$

Nota: La constante 25400 se utiliza cuando se trabaja en milímetros; si se usaran pulgadas, la constante sería 1000.

Utilizando el número de curva **CN = 74**, previamente calculado para la cuenca, se tiene:

$$S = (25400/74) - 254 = 89.24$$

$$I_a = 0.2 \times 89.24$$

$$I_a = 17.85 \text{ mm}$$

La abstracción inicial estimada para la cuenca es de 17.85 mm, lo cual significa que, durante un evento de precipitación, los primeros 17.85 mm de lluvia serán retenidos por el sistema antes de que ocurra escurrimiento superficial. Este parámetro será utilizado en la ecuación del método SCS para determinar el volumen de escorrentía directa, siendo clave para simular adecuadamente la respuesta hidrológica de la cuenca ante diferentes eventos de precipitación.

#### 4.2.3. Cálculo de caudal pico

Para la estimación de caudales máximos en la microcuenca de estudio, se empleó el programa HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), herramienta desarrollada por el USACE (U.S. Army Corps of Engineers), especializada en la modelación de procesos hidrológicos. El procedimiento seguido consta de la creación y configuración de los distintos componentes del modelo hidrológico.

##### 1. Basin Model Manager (Modelo de Cuenca)

El primer paso fue la creación del modelo de cuenca, en el que se importó la delimitación de la microcuenca generada en QGIS. En este modelo se definieron los siguientes elementos:

- **Sub-basin:** Representa la totalidad de la cuenca, con su punto de salida (desemboque).
- **Sink o sumidero:** Punto de salida final de la escorrentía, ubicado en la parte baja de la cuenca.
- Ambos elementos fueron conectados mediante un conducto de flujo, representando el cauce principal.

Posteriormente, se ingresaron los parámetros morfométricos de la cuenca. Para el método de pérdidas, se seleccionó SCS Curve Number, estableciendo:

- **Número de curva (CN):** 74 (obtenido previamente en función del uso y tipo de suelo).
- **Abstracción inicial (I<sub>a</sub>):** 17.85 mm.

- **Método de transformación de escurrentía: SCS Hidrograma Unitario**, lo cual permite simular la respuesta de caudal ante un evento de lluvia.
- **Lag time (tiempo de retardo):** 25.37 minutos (calculado como el 60% del tiempo de concentración estimado por Kirpich).

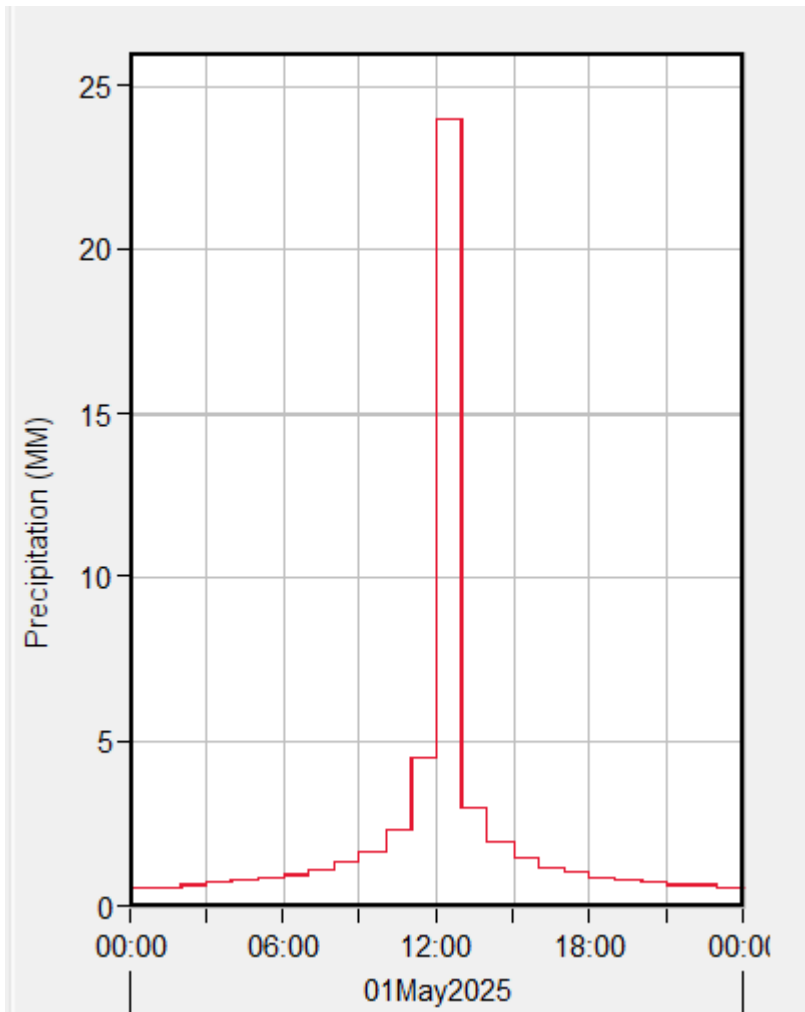
## **2. Time-Series Data Manager (Gestión de Datos de Serie de Tiempo)**

Se procedió a la creación del pluviógrafo, que representa el evento de precipitación. La configuración se realizó con los siguientes parámetros:

- **Intervalo de tiempo:** 1 hora.
- **Fecha de inicio del evento:** según evento de diseño o evento histórico seleccionado.
- **Hietograma:** se ingresaron manualmente los valores de precipitación horaria. Se verificó la consistencia del hietograma mediante su visualización gráfica en el programa (ver Figura 40).

**Figura 40**

*Verificación de hietograma en HEC-HMS*



*Nota.* Verificación de hietograma en HEC HMS, previo a la obtención de caudales máximos.

### **3. Meteorologic Model Manager (Modelo Meteorológico)**

Se creó el modelo meteorológico correspondiente y se asoció al modelo de cuenca. Se seleccionó como fuente de precipitación el pluviógrafo definido anteriormente. Este componente permite la vinculación entre la lluvia registrada y la cuenca que la recibe.

### **4. Control Specifications Manager (Especificaciones de Control)**

Finalmente, se establecieron las especificaciones de control para la simulación:

- **Hora de inicio:** 00:00 horas del evento seleccionado.
- **Hora de término:** 12:00 horas (ciclo de 12 horas de simulación).

- **Intervalo de simulación:** 30 minutos.

Esta configuración asegura una adecuada resolución temporal para observar el comportamiento hidrológico del evento, permitiendo identificar con precisión el caudal pico y el momento de su ocurrencia.

## 5. Simulación y Resultados

Con todos los componentes debidamente configurados, se ejecutó la simulación. El programa genera como salida:

- El **hidrograma de escorrentía**, representando el caudal en función del tiempo.
- El **caudal máximo (pico)** asociado al hietograma ingresado.
- Estadísticos clave del evento, como volumen escurrido y tiempo al pico.

Este procedimiento fue repetido para distintos periodos de retorno, modificando únicamente los datos del hietograma correspondiente a cada uno. De esta forma, se obtuvo una estimación diferenciada del comportamiento hidrológico extremo de la microcuenca.

**Tabla 31**

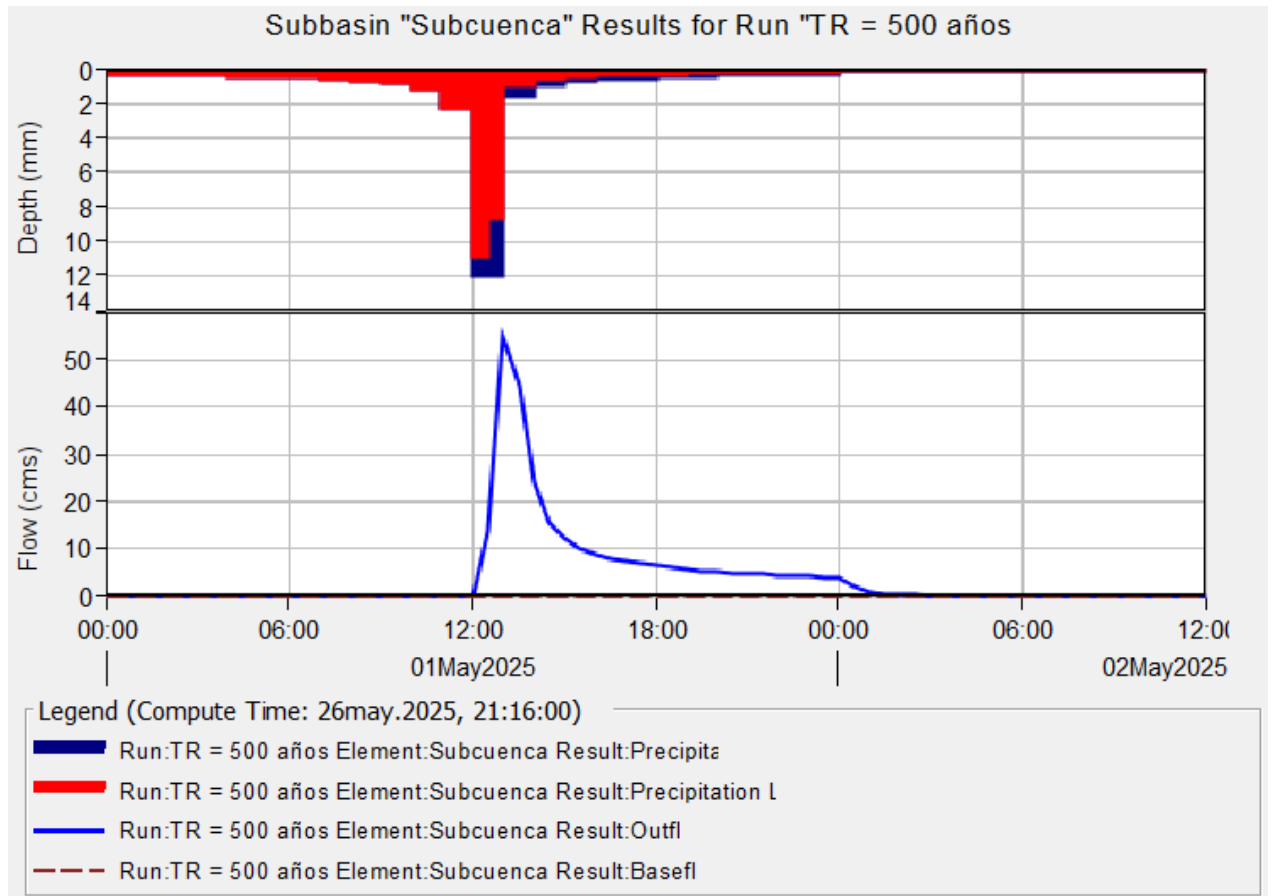
*Caudales máximos de diseño ( $m^3/s$ )*

<b>Tr = 5 años</b>	16.2
<b>Tr = 10 años</b>	20.2
<b>Tr = 20 años</b>	24.7
<b>Tr = 25 años</b>	26.4
<b>Tr = 50 años</b>	31.8
<b>Tr = 70 años</b>	34.6
<b>Tr = 100 años</b>	37.9
<b>Tr = 150 años</b>	41.8
<b>Tr = 200 años</b>	44.7
<b>Tr = 250 años</b>	47.1
<b>Tr = 500 años</b>	55

*Nota.* Los valores corresponden a los caudales máximos simulados mediante el modelo hidrológico HEC-HMS para distintos periodos de retorno.

**Figura 41**

*Hietograma de simulación*



*Nota.* Hietograma de simulación mostrado por el programa HEC HMS

**Figura 42**

*Series de tiempo para simulación*

Time-Series Results for Subbasin "Subcuenca"

Project: CuencaRuth    Simulation Run: TR = 500 años  
Subbasin: Subcuenca

Start of Run: 01may.2025, 00:00    Basin Model: Microcuenca  
End of Run: 02may.2025, 12:00    Meteorologic Model: Met 1  
Compute Time: 26may.2025, 21:16:00    Control Specifications: Control 1

Date	Time	Precip (MM)	Loss (MM)	Excess (MM)	Direct Flow (M3/S)	Baseflow (M3/S)	Total Flow (M3/S)
01may.2025	21:30	0.34	0.18	0.16	4.5	0.0	4.5
01may.2025	22:00	0.34	0.18	0.16	4.4	0.0	4.4
01may.2025	22:30	0.31	0.16	0.15	4.2	0.0	4.2
01may.2025	23:00	0.31	0.16	0.15	4.1	0.0	4.1
01may.2025	23:30	0.29	0.15	0.14	4.0	0.0	4.0
02may.2025	00:00	0.29	0.15	0.14	3.9	0.0	3.9
02may.2025	00:30	0.00	0.00	0.00	2.0	0.0	2.0
02may.2025	01:00	0.00	0.00	0.00	0.6	0.0	0.6
02may.2025	01:30	0.00	0.00	0.00	0.2	0.0	0.2
02may.2025	02:00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	02:30	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	03:00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	03:30	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	04:00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	04:30	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	05:00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	05:30	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	06:00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	06:30	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	07:00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	07:30	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	08:00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	08:30	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	09:00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	09:30	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	10:00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	10:30	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	11:00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	11:30	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
02may.2025	12:00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0

*Nota.* Series de tiempo de simulación resultantes de HEC HMS

### 4.3. Identificación de zonas vulnerables (HEC – RAS)

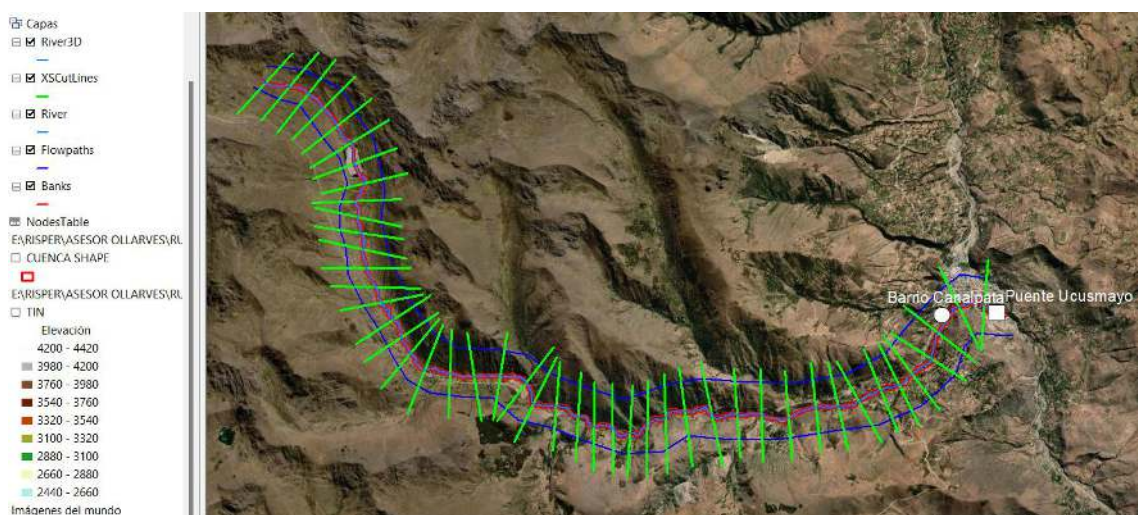
Para la identificación de zonas potencialmente inundables en la localidad de San Miguel, se partió de la obtención del Modelo de Elevación Digital (DEM) correspondiente a la cuenca del río Ucumayo. A partir de este modelo, se generaron las curvas de nivel necesarias para la construcción del modelo TIN (Triangulated Irregular Network), el cual permite una representación tridimensional más precisa del terreno, fundamental para la modelación hidráulica.

Con apoyo del modelo TIN y utilizando el programa HEC-GeoRAS en ArcGIS, se procedió a digitalizar los elementos geomorfológicos esenciales para la simulación hidráulica. Entre ellos se encuentran:

- **Stream Centerline:** eje del cauce principal del río.
- **Bank Lines:** márgenes derecha e izquierda del río, delimitando el canal principal.
- **Flow Paths:** trayectorias del flujo en ambas márgenes, necesarias para calcular longitudes hidráulicas.
- **XSCutlines:** secciones transversales perpendiculares al cauce, fundamentales para representar la geometría del canal.

**Figura 43**

*Primer procesamiento con HEC – GEO RAS en ArcGis*



*Nota.* Primera parte del procesamiento con HEC – Geo RAS en ArcGis.

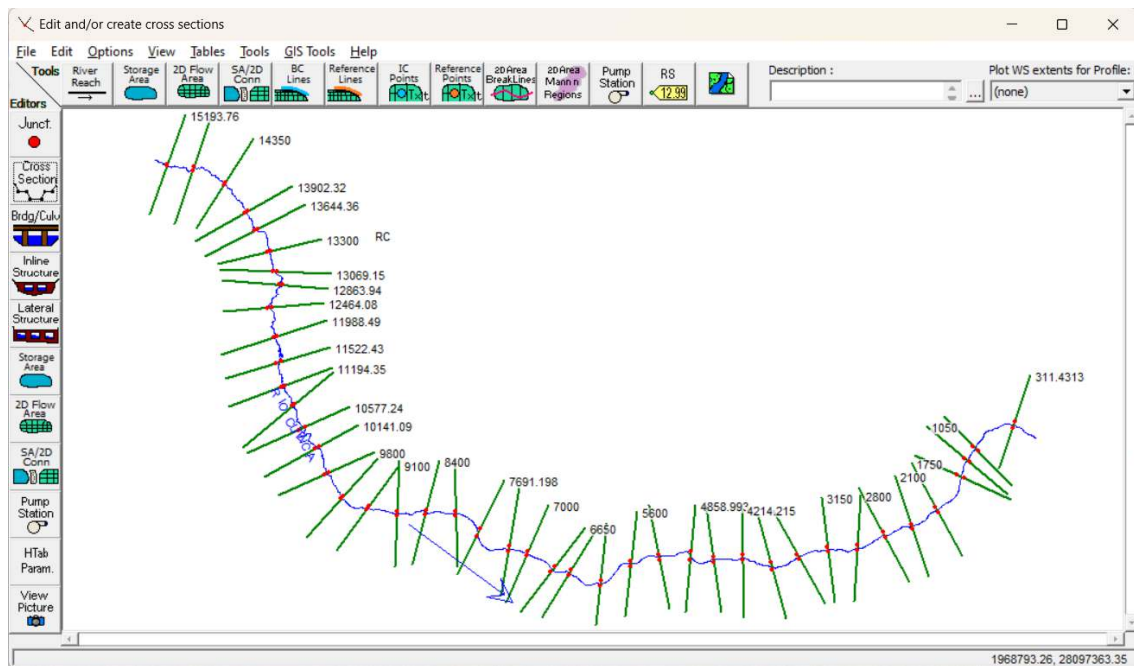
Una vez completada la digitalización, se generaron el río y las secciones transversales en 3D, los cuales fueron exportados al programa HEC-RAS para realizar la simulación hidráulica unidimensional.

Ya en HEC-RAS, se importó la geometría del río y se asignaron los coeficientes de rugosidad de Manning, en función de las características físicas del cauce:

- **Zona central del canal:**  $n=0.040$ , representando un cauce natural con cierta obstrucción por vegetación y rugosidad natural.
- **Zonas laterales:**  $n=0.027$ , propias de áreas con vegetación baja o superficies más lisas.

**Figura 44**

*Ingreso de geometría en HEC – RAS*



*Nota.* Ingreso de datos geométricos, resultantes del procesamiento en HEC – GEO RAS, a HEC – RAS.

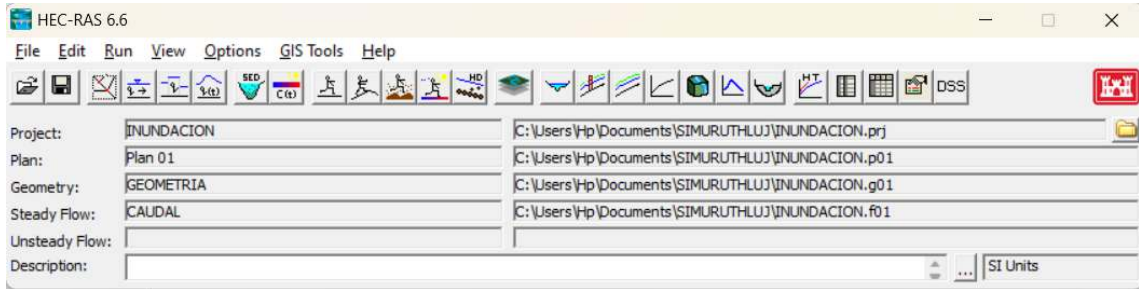
Posteriormente, se ingresaron los caudales pico correspondientes a los periodos de retorno seleccionados:

- **5 años** (evento frecuente),
- **70 años** (evento significativo intermedio)
- **500 años** (evento extremo o catastrófico).

Adicionalmente, se incorporó el valor de la pendiente del río aguas abajo, estimada en 0.1318, conforme a los parámetros geomorfológicos obtenidos en el análisis de la cuenca.

### Figura 45

*Datos completos en HEC - RAS*

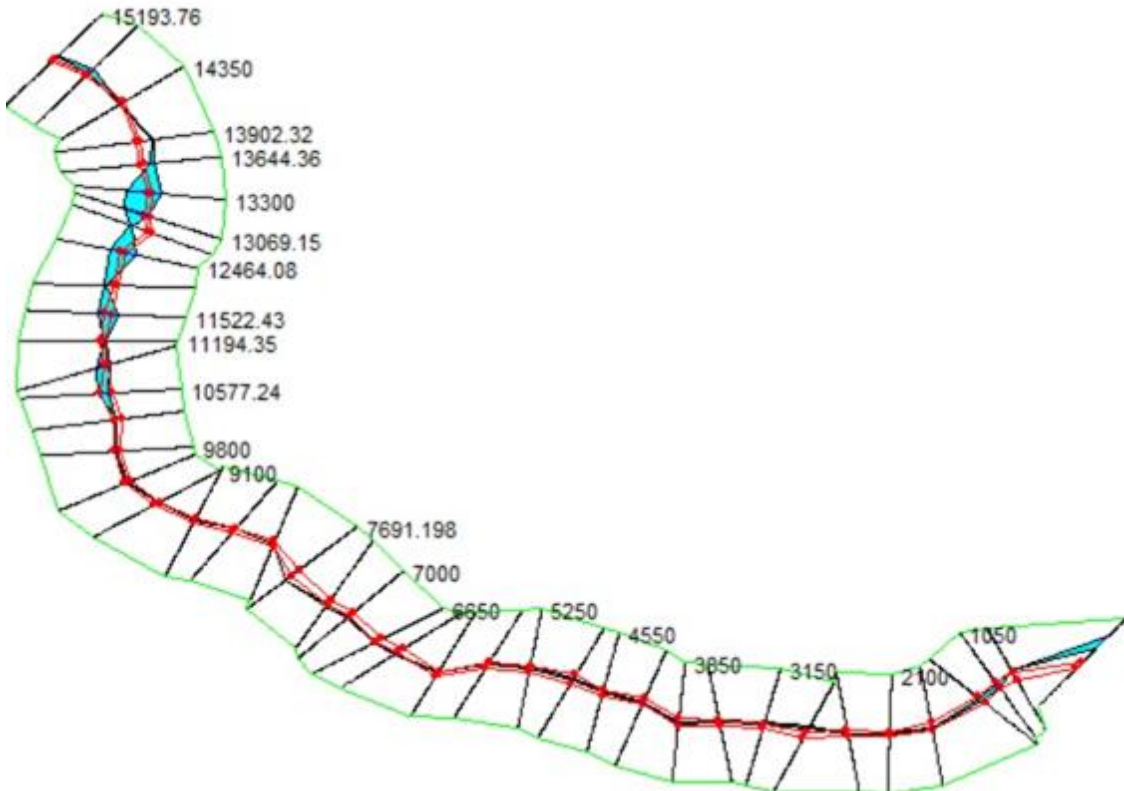


*Nota.* Datos completos en para correr el modelamiento en HEC – RAS.

Tras configurar los datos hidráulicos, se ejecutó la simulación. El modelo permite observar los resultados en vistas tridimensionales y secciones transversales en gráficos X–Y–Z, facilitando la visualización del comportamiento del flujo, el nivel del agua en distintos escenarios y la posible ocurrencia de desbordes e inundaciones.

### Figura 46

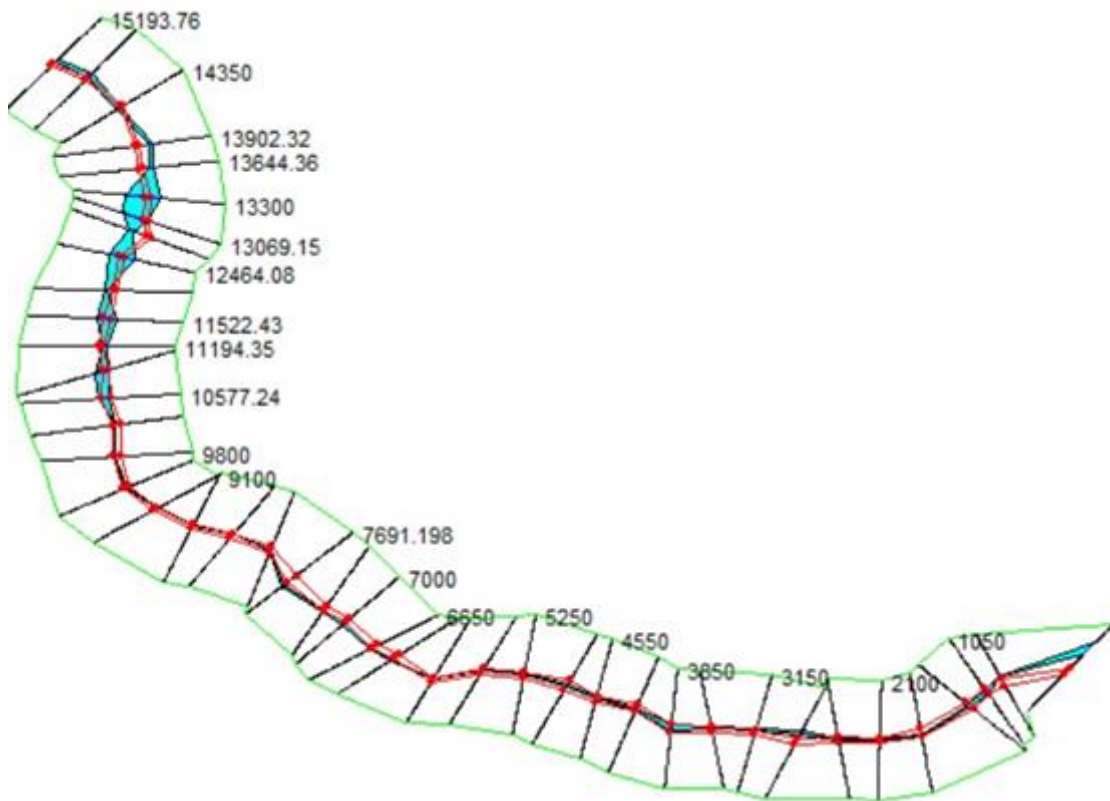
*Vista de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR-5 años)*



*Nota.* Vista de modelado en 3 dimensiones en HEC RAS para un tiempo de retorno de 5 años

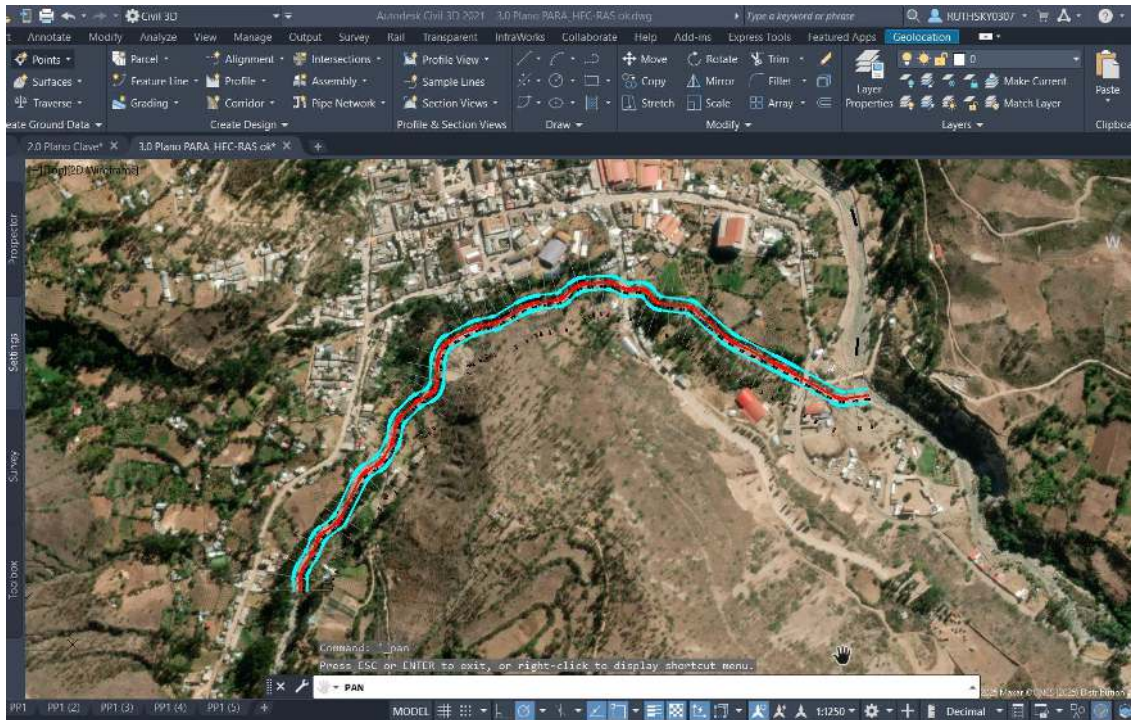
**Figura 47**

*Vista de Modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR-500 años)*

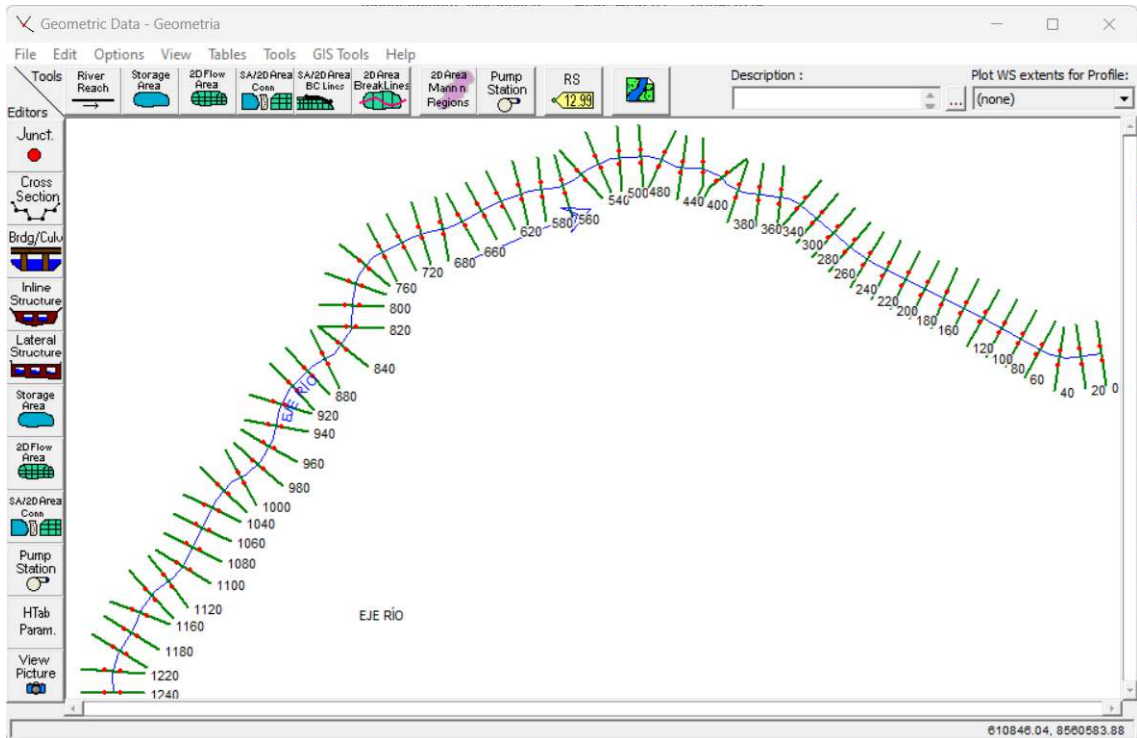


*Nota.* Vista de modelado en 3 dimensiones en HEC RAS para un tiempo de retorno de 500 años

Se realizó un levantamiento topográfico en campo en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucusmayo (1.140 km), a partir del cual se obtuvieron secciones transversales representativas de la morfología del cauce, procesadas mediante el software Civil 3D. Este procedimiento permitió asegurar una adecuada precisión en la geometría del río y sus márgenes. Las secciones resultantes constituyeron la base fundamental para la caracterización hidráulica del tramo en estudio y fueron empleadas como datos de entrada en el programa HEC-RAS.



Una vez obtenidas las secciones transversales, estas fueron exportadas e incorporadas al programa HEC-RAS, dentro del módulo de geometría. En este entorno se procedió a definir los elementos necesarios para la simulación, tales como los límites del cauce, las márgenes laterales y la disposición de las secciones en las progresivas correspondientes según la topografía levantada en campo. De este modo, se garantizó la adecuada representación espacial del río en el modelo hidráulico.



Posteriormente, se asignaron los coeficientes de rugosidad de Manning para los diferentes sectores del cauce, de acuerdo con sus características físicas. En este caso, se estableció un valor de  $n = 0.027$  para los bordes, debido a la presencia de vegetación escasa y condiciones de menor rugosidad, mientras que para el cauce central, donde el flujo se concentra y la rugosidad es mayor, se utilizó un valor de  $n = 0.04$ . Esta diferenciación permitió una representación más realista del comportamiento hidráulico del tramo estudiado.

**Figura 48**

*Número de Manning para el modelamiento*

Edit Manning's n or k Values

River: (All Rivers)  Edit Interpolated XS's Channel n Values have a light green background

Reach: All Regions

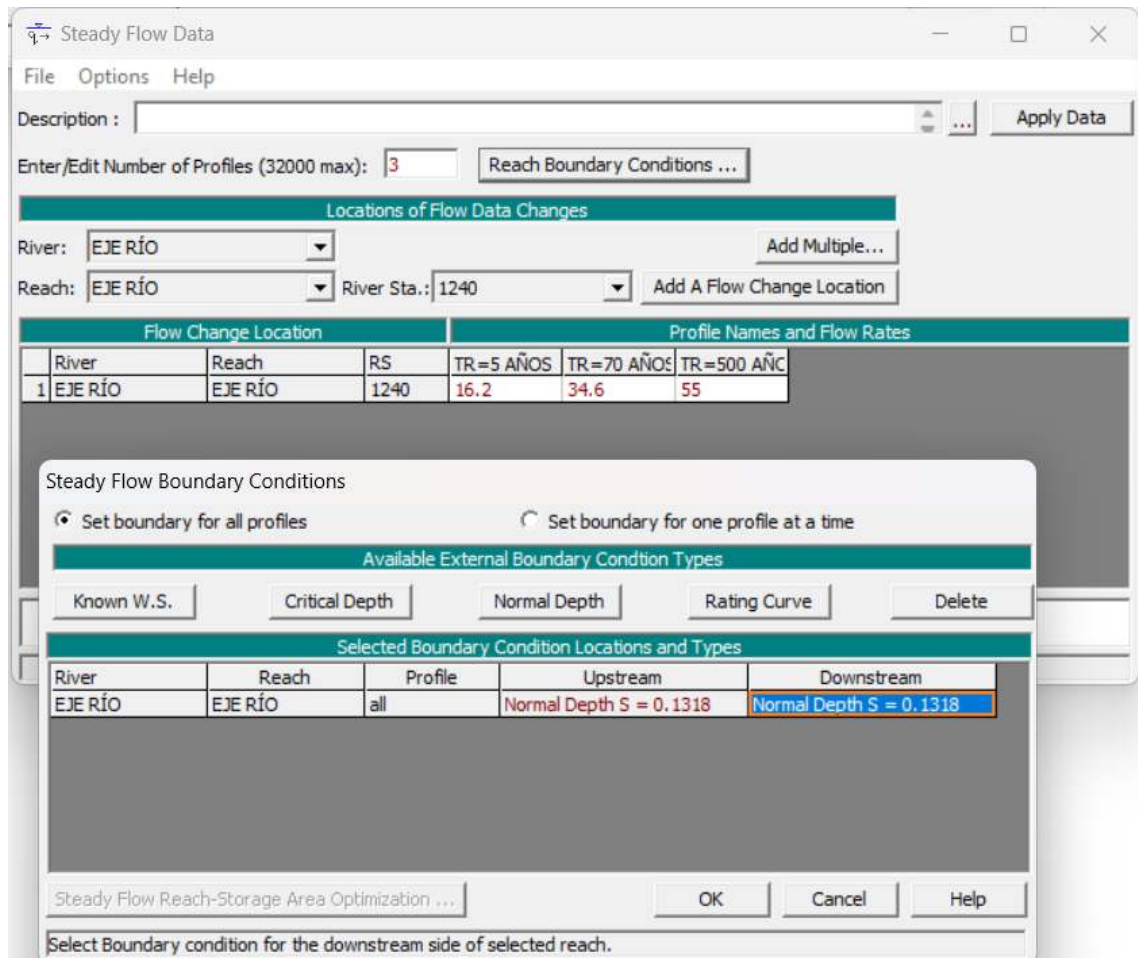
Selected Area Edit Options: Add Constant ... Multiply Factor ... **Set Values ...** Replace ... Reduce to L Ch R ...

	River	Reach	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	EJE RÍO	EJE RÍO	1240	n	0.027	0.040	0.027
2	EJE RÍO	EJE RÍO	1220	n	0.027	0.040	0.027
3	EJE RÍO	EJE RÍO	1200	n	0.027	0.040	0.027
4	EJE RÍO	EJE RÍO	1180	n	0.027	0.040	0.027
5	EJE RÍO	EJE RÍO	1160	n	0.027	0.040	0.027
6	EJE RÍO	EJE RÍO	1140	n	0.027	0.040	0.027
7	EJE RÍO	EJE RÍO	1120	n	0.027	0.040	0.027
8	EJE RÍO	EJE RÍO	1100	n	0.027	0.040	0.027
9	EJE RÍO	EJE RÍO	1080	n	0.027	0.040	0.027
10	EJE RÍO	EJE RÍO	1060	n	0.027	0.040	0.027
11	EJE RÍO	EJE RÍO	1040	n	0.027	0.040	0.027
12	EJE RÍO	EJE RÍO	1020	n	0.027	0.040	0.027
13	EJE RÍO	EJE RÍO	1000	n	0.027	0.040	0.027
14	EJE RÍO	EJE RÍO	980	n	0.027	0.040	0.027
15	EJE RÍO	EJE RÍO	960	n	0.027	0.040	0.027
16	EJE RÍO	EJE RÍO	940	n	0.027	0.040	0.027
17	EJE RÍO	EJE RÍO	920	n	0.027	0.040	0.027
18	EJE RÍO	EJE RÍO	900	n	0.027	0.040	0.027
19	EJE RÍO	EJE RÍO	880	n	0.027	0.040	0.027
20	EJE RÍO	EJE RÍO	860	n	0.027	0.040	0.027
21	EJE RÍO	EJE RÍO	840	n	0.027	0.040	0.027
22	EJE RÍO	EJE RÍO	820	n	0.027	0.040	0.027
23	EJE RÍO	EJE RÍO	800	n	0.027	0.040	0.027
24	EJE RÍO	EJE RÍO	780	n	0.027	0.040	0.027
25	EJE RÍO	EJE RÍO	760	n	0.027	0.040	0.027
26	EJE RÍO	EJE RÍO	740	n	0.027	0.040	0.027
27	EJE RÍO	EJE RÍO	720	n	0.027	0.040	0.027
28	EJE RÍO	EJE RÍO	700	n	0.027	0.040	0.027
29	EJE RÍO	EJE RÍO	680	n	0.027	0.040	0.027
30	EJE RÍO	EJE RÍO	660	n	0.027	0.040	0.027
31	EJE RÍO	EJE RÍO	640	n	0.027	0.040	0.027
32	EJE RÍO	EJE RÍO	620	n	0.027	0.040	0.027
33	EJE RÍO	EJE RÍO	600	n	0.027	0.040	0.027
34	EJE RÍO	EJE RÍO	580	n	0.027	0.040	0.027
35	EJE RÍO	EJE RÍO	560	n	0.027	0.040	0.027

OK Cancel Help

*Nota.* Se observa el número de Manning para bordes y cauce del río.

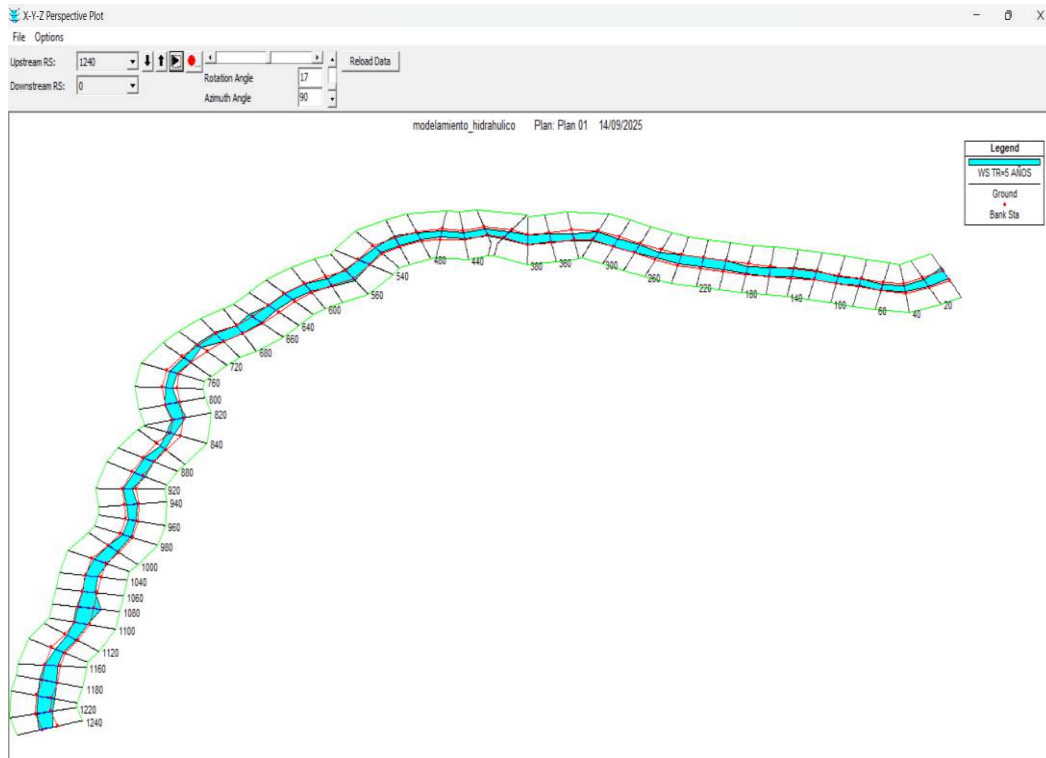
Con la geometría y los parámetros de rugosidad definidos, se incorporaron los caudales máximos obtenidos en la fase hidrológica para los diferentes periodos de retorno considerados. Asimismo, se incluyó la pendiente longitudinal del cauce principal, derivada del análisis topográfico, lo que permitió establecer el marco hidráulico de la simulación. De esta forma, se integraron en el modelo los factores fundamentales que condicionan el comportamiento del flujo en condiciones de crecida.



Es así como se ejecutaron las simulaciones en HEC-RAS para cada uno de los periodos de retorno analizados, obteniéndose los perfiles de la lámina de agua y las secciones transversales correspondientes en cada progresiva definida. Estos resultados permitieron identificar la extensión lateral de las inundaciones, la distribución de las profundidades y las velocidades de flujo en distintos escenarios de creciente, constituyendo así una herramienta clave para la delimitación de las zonas vulnerables dentro del área de estudio.

**Figura 49**

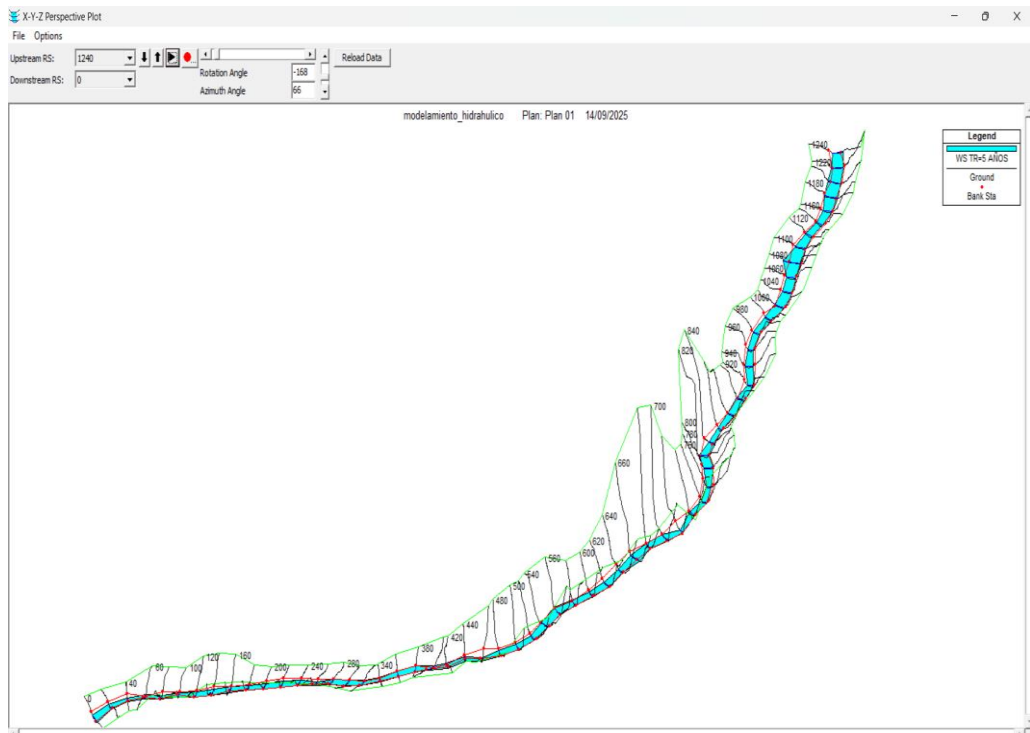
*Vista 1 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR-5 años)*



*Nota.* Vista en planta del modelamiento

**Figura 50**

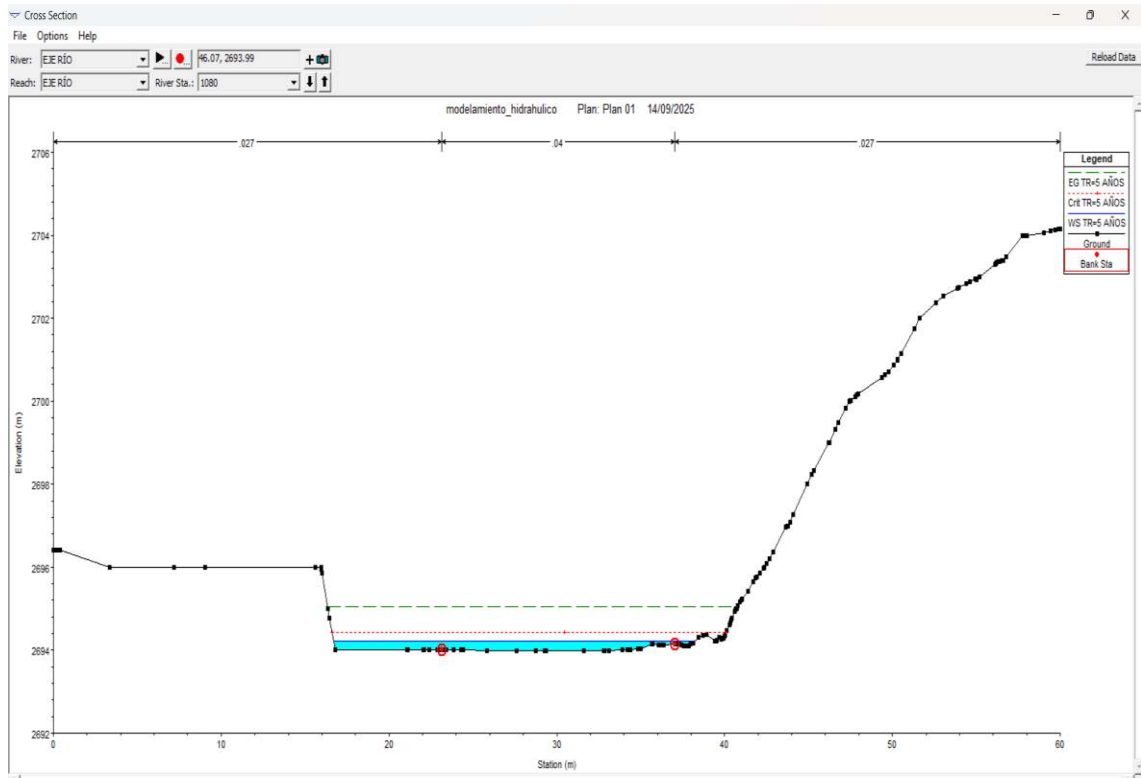
*Vista 2 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR-5 años)*



*Nota.* Vista de perfil del modelamiento

**Figura 51**

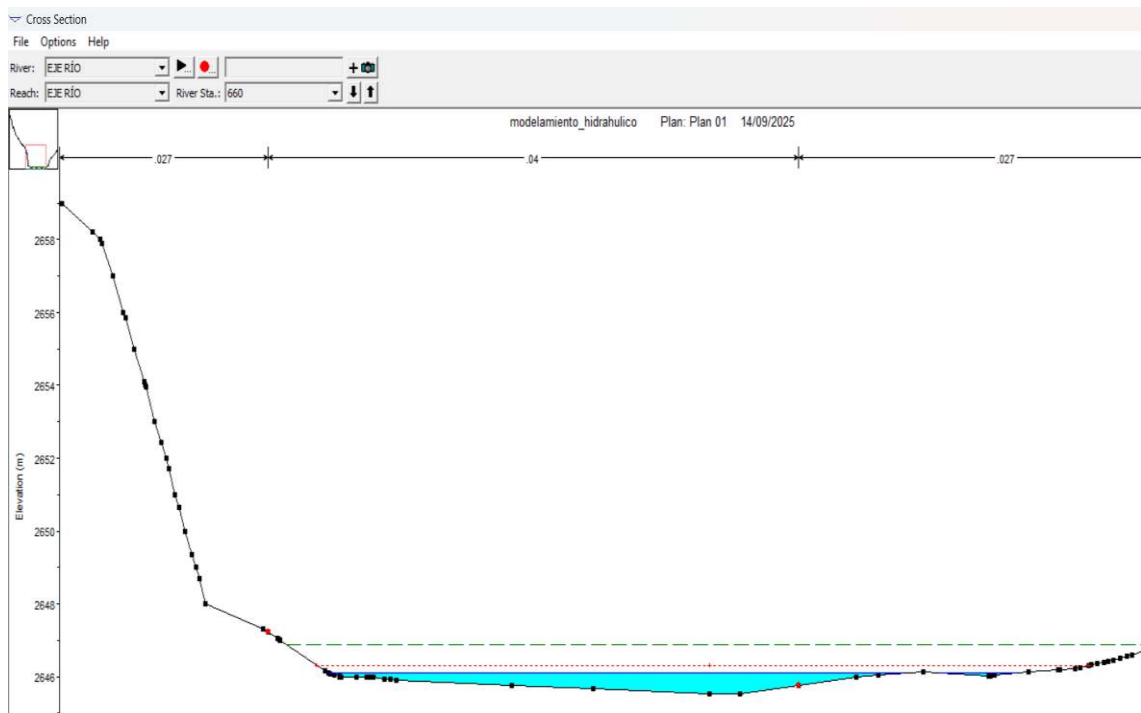
*Sección transversal 1 de simulación de inundación (TR=5 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 0+160 KM

**Figura 52**

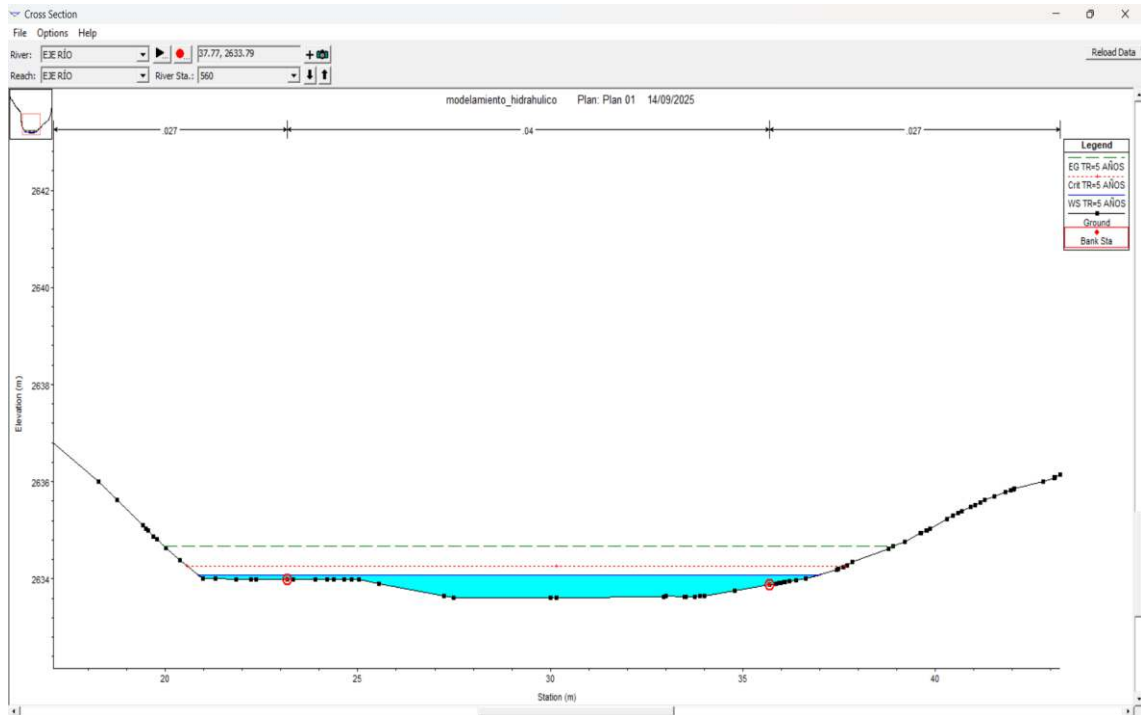
*Sección transversal 2 de simulación de inundación (TR=5 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 0+580 KM

**Figura 53**

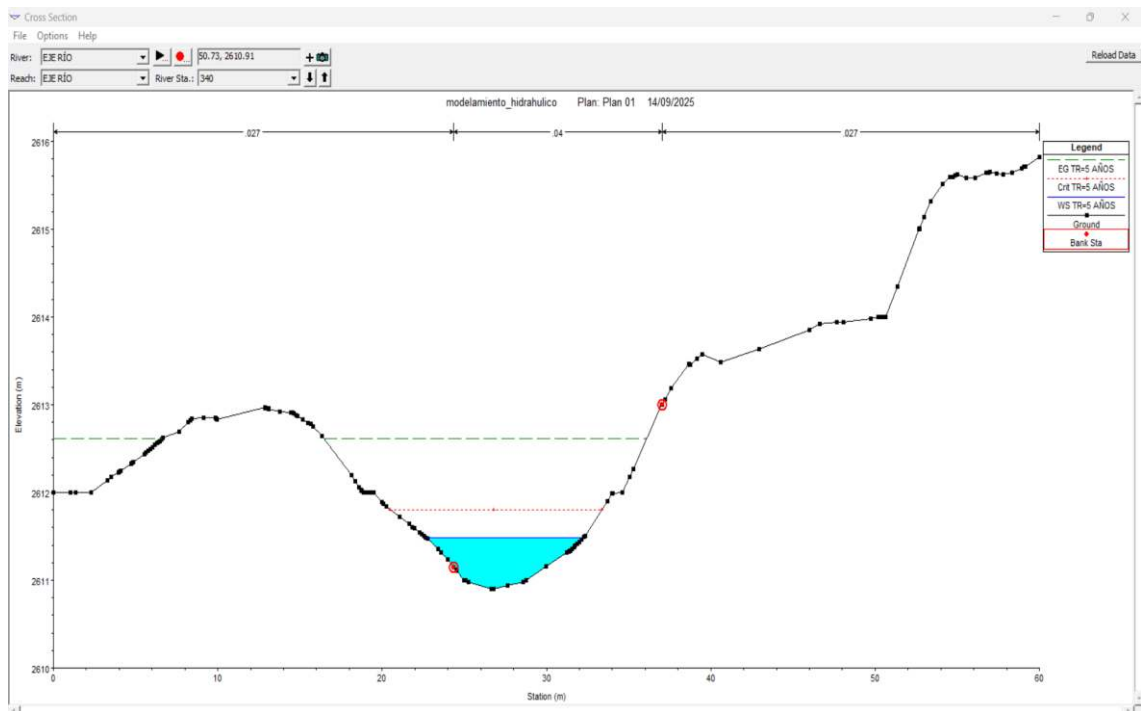
*Sección transversal 3 de simulación de inundación (TR=5 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 0+680 KM

**Figura 54**

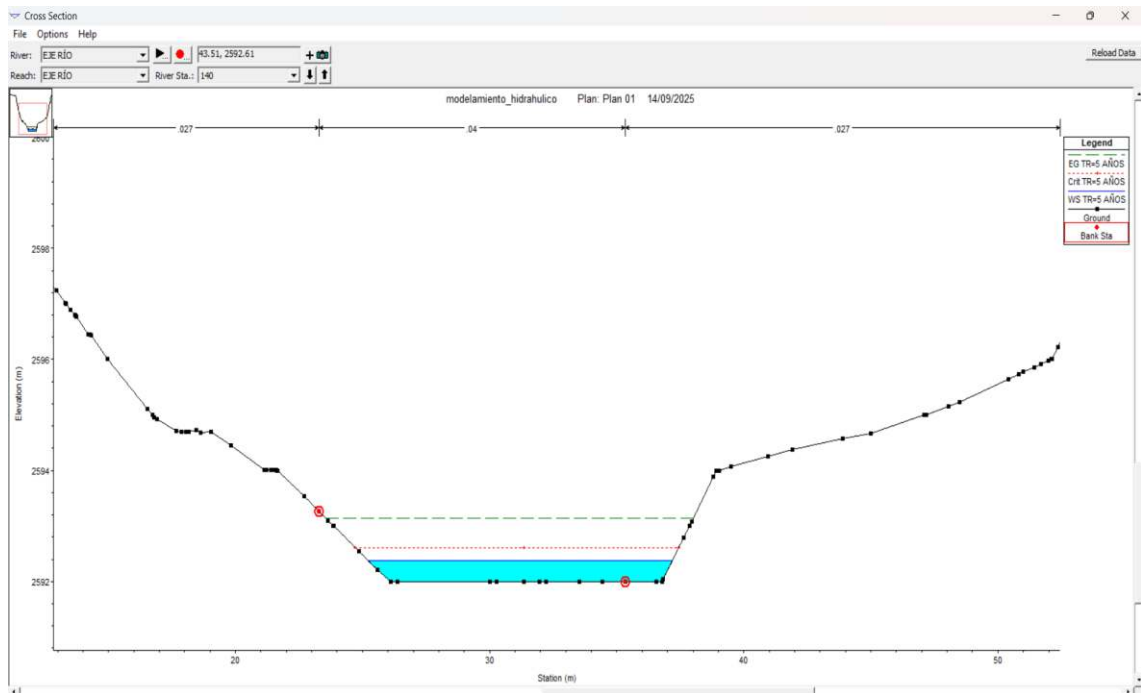
*Sección transversal 4 de simulación de inundación (TR=5 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 0+900 KM

**Figura 55**

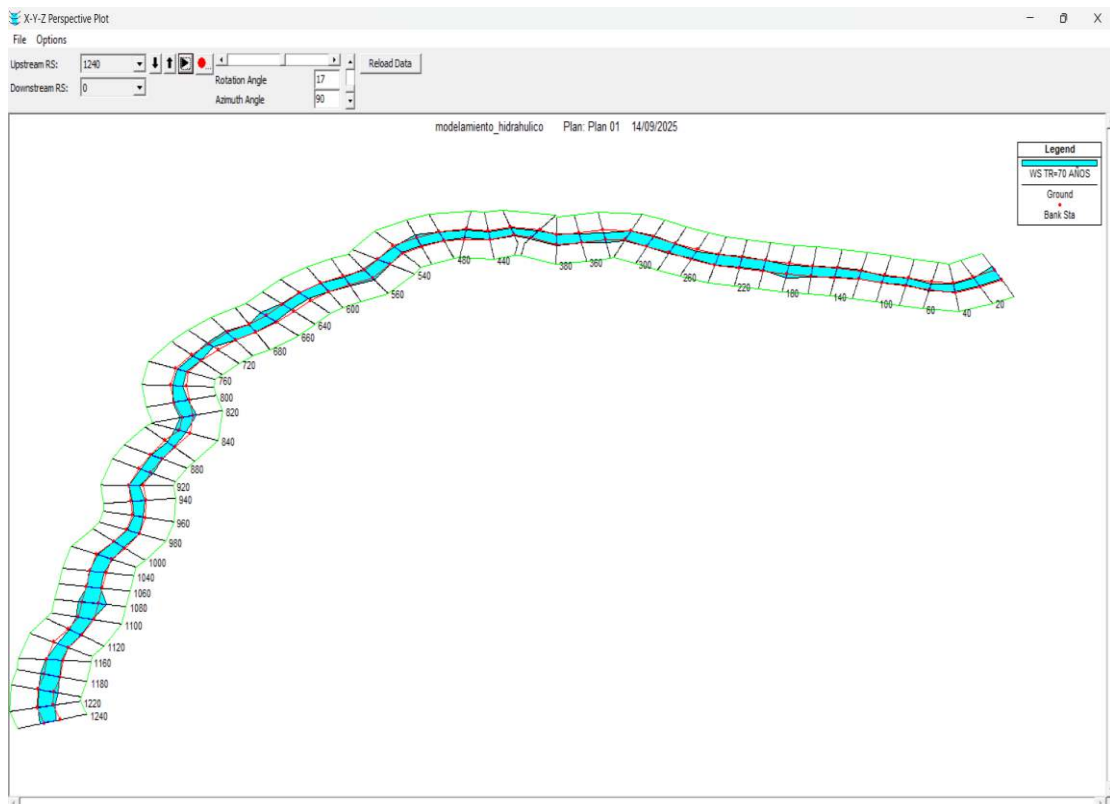
*Sección transversal 4 de simulación de inundación (TR=5 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 1+100 KM

**Figura 56**

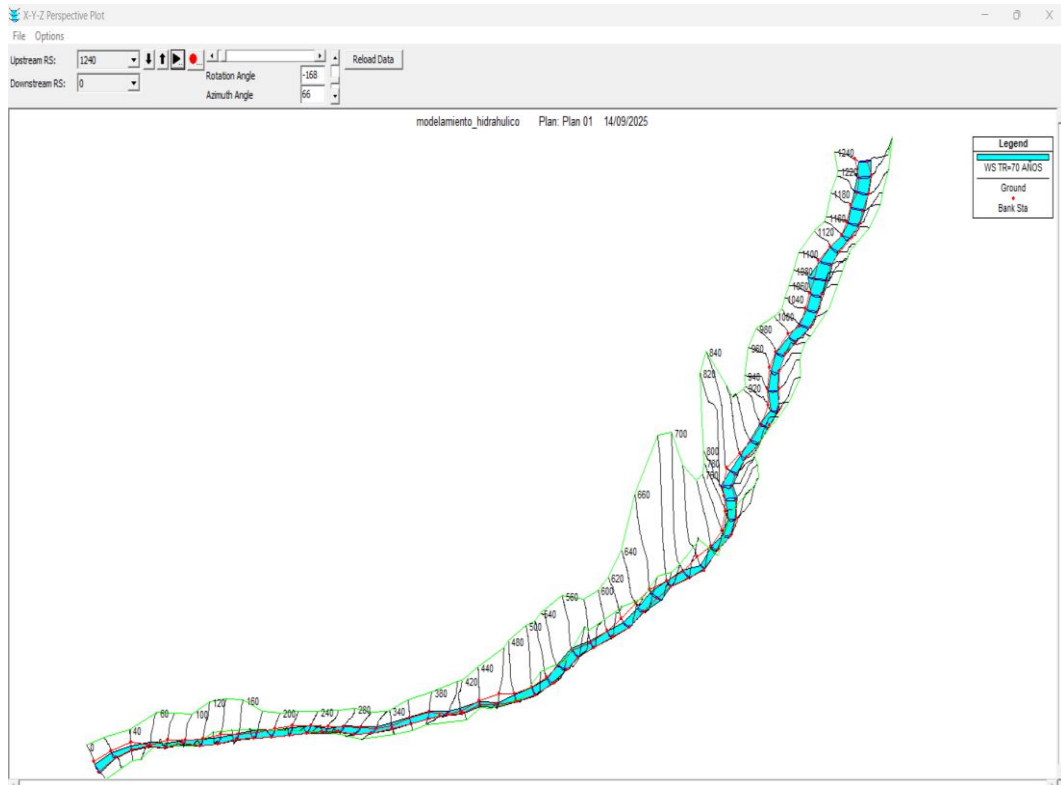
*Vista 1 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR=70 años)*



*Nota.* Vista en planta del modelamiento

**Figura 57**

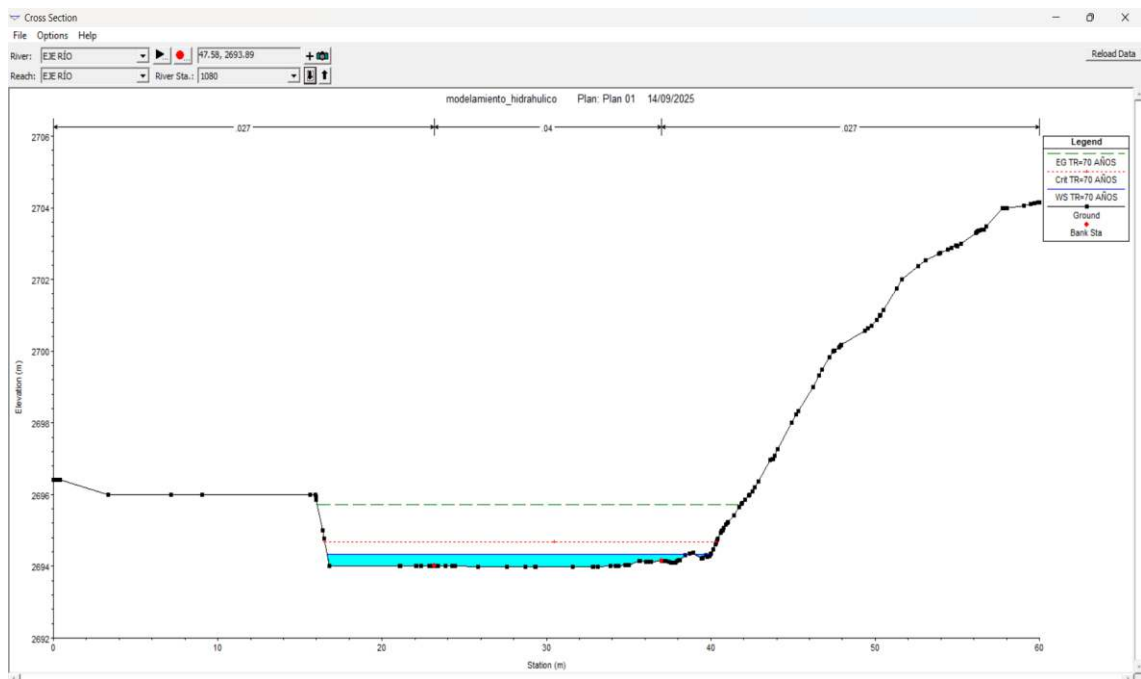
*Vista 2 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR=70 años)*



*Nota. Vista de perfil del modelamiento*

**Figura 58**

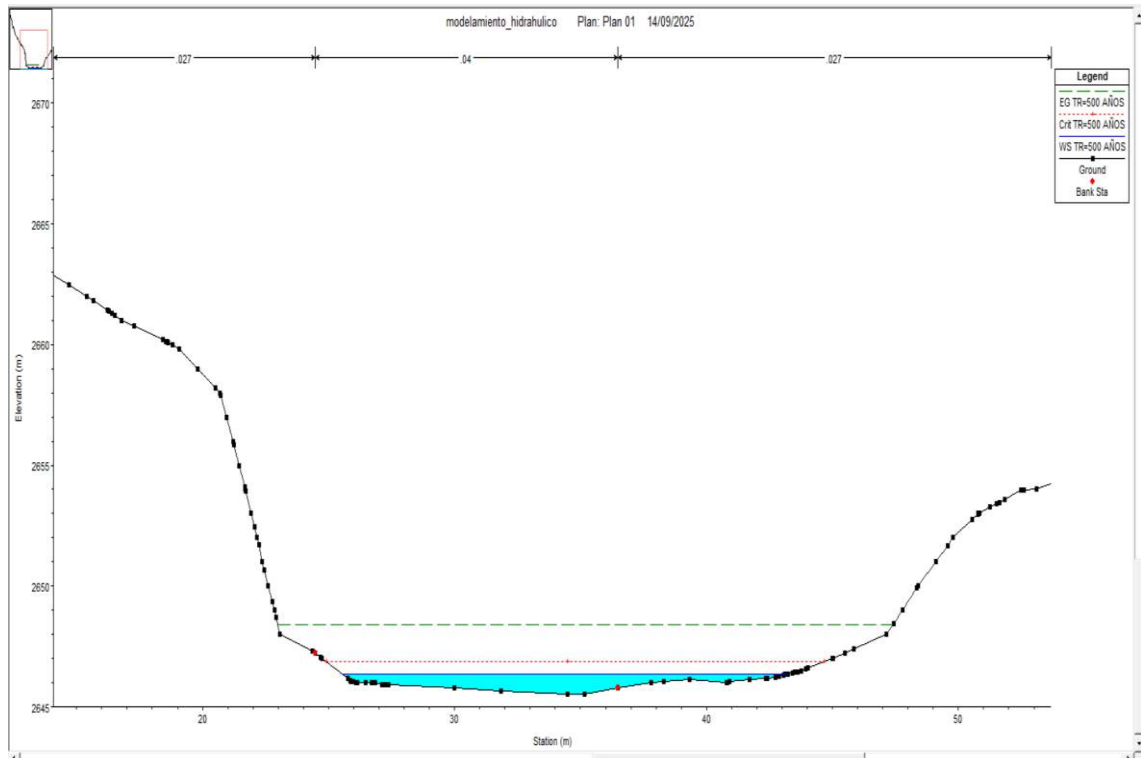
*Sección transversal 1 de simulación de inundación (TR=70 años)*



*Nota. Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 0+160 KM*

**Figura 59**

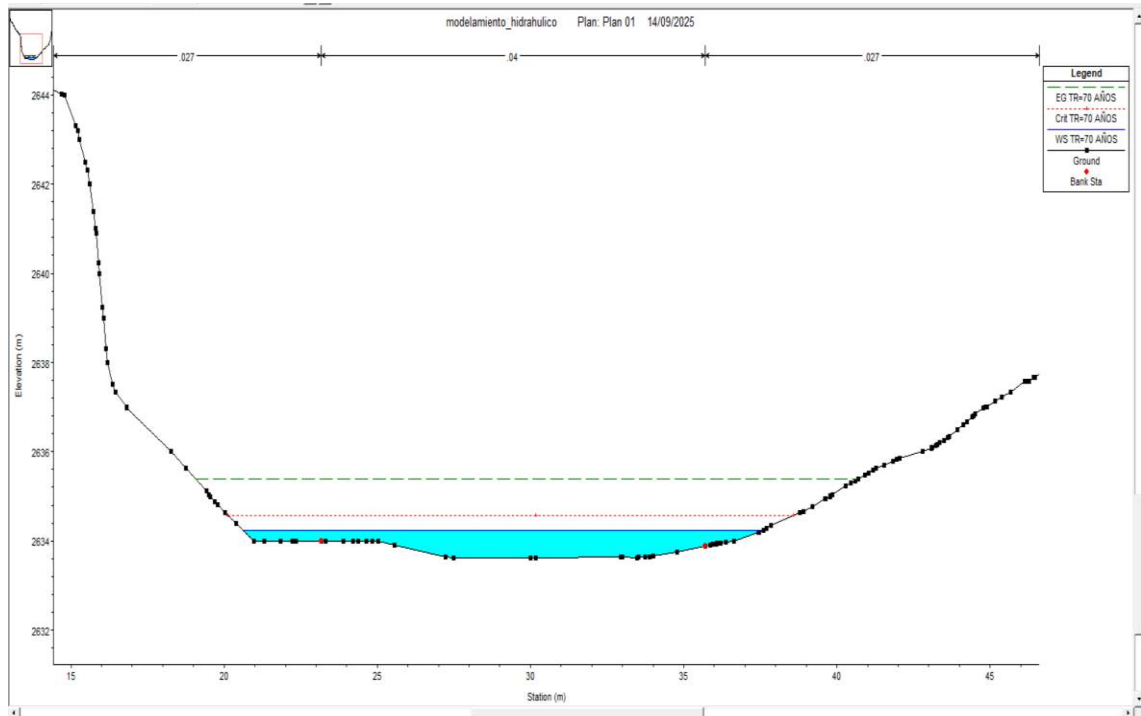
*Sección transversal 2 de simulación de inundación (TR=70 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 0+580 KM

**Figura 60**

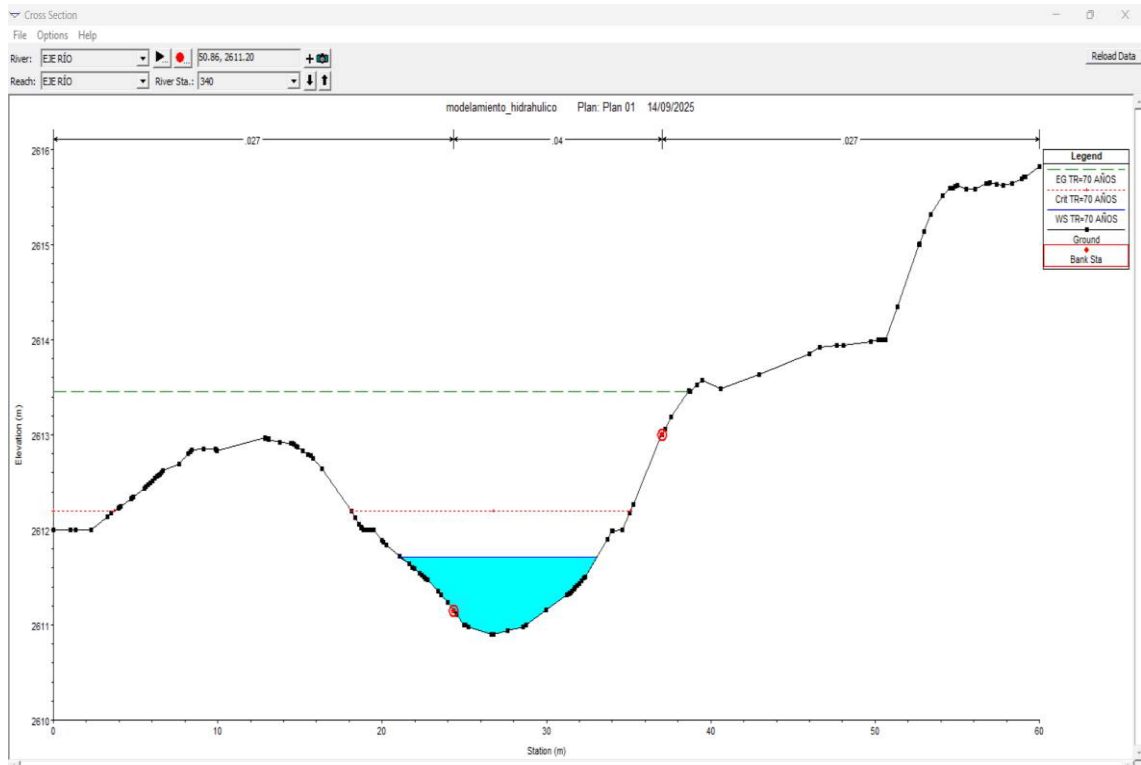
*Sección transversal 3 de simulación de inundación (TR=70 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 0+680 KM

**Figura 61**

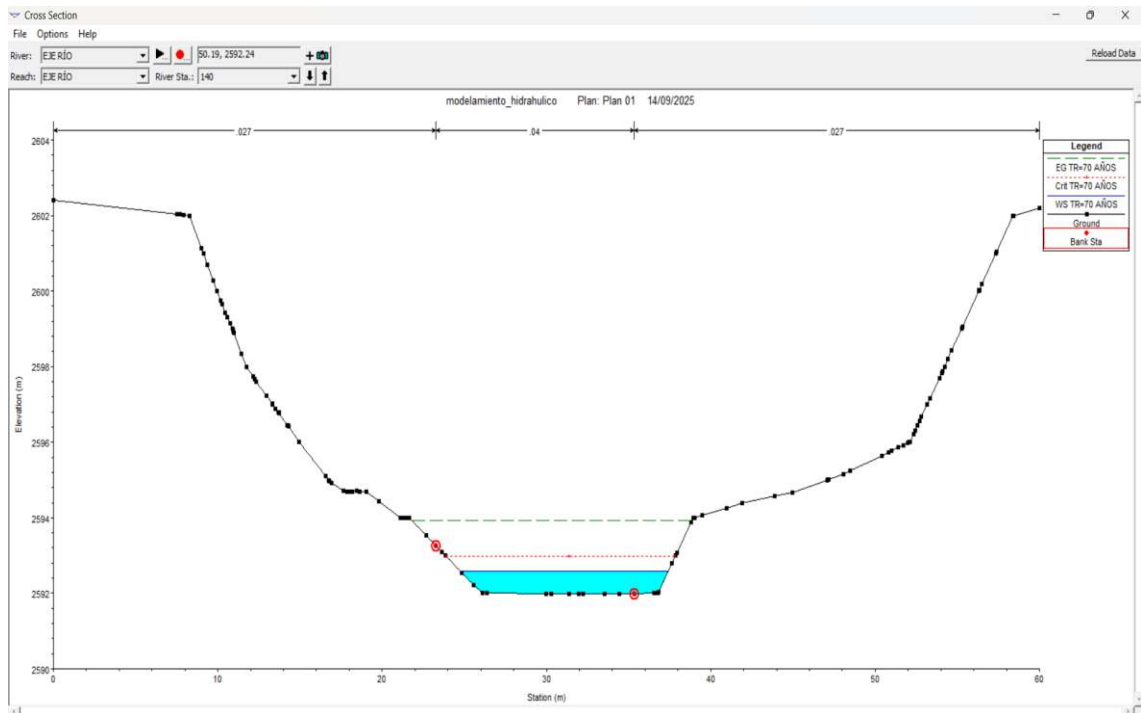
*Sección transversal 4 de simulación de inundación (TR=70 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 0+900 KM

**Figura 62**

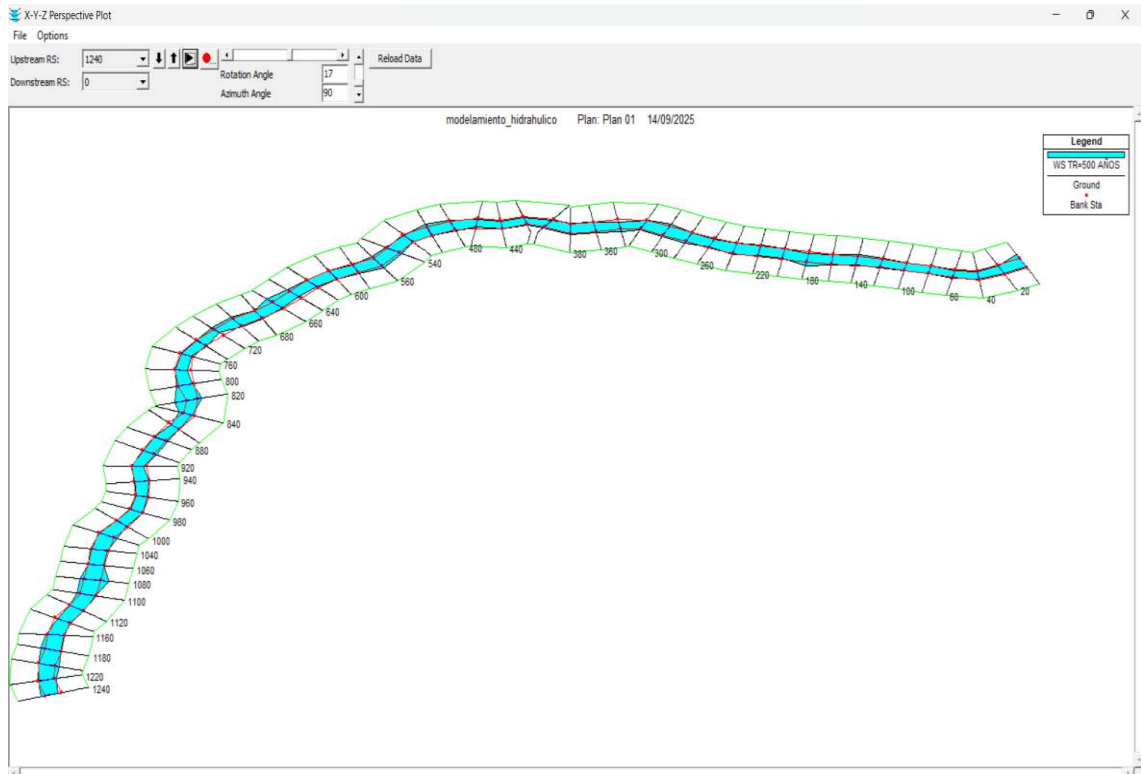
*Sección transversal 4 de simulación de inundación (TR=70 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 1+100 KM

**Figura 63**

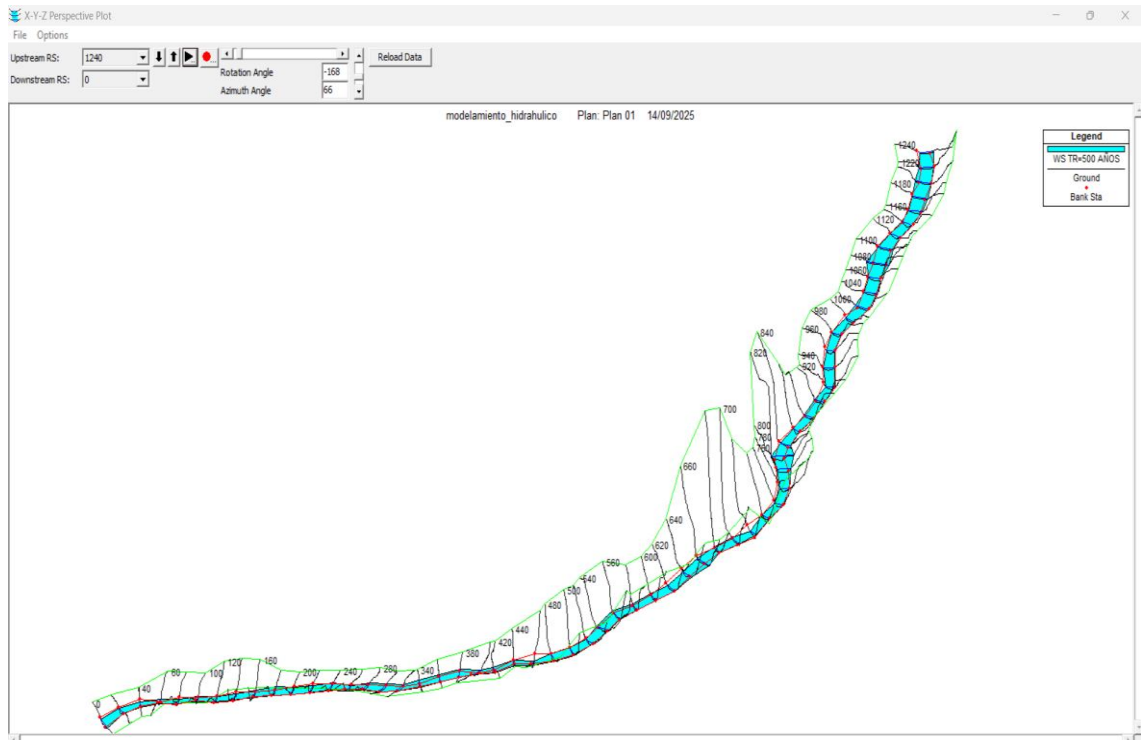
*Vista 1 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR-500 años)*



*Nota.* Vista en planta del modelamiento

**Figura 64**

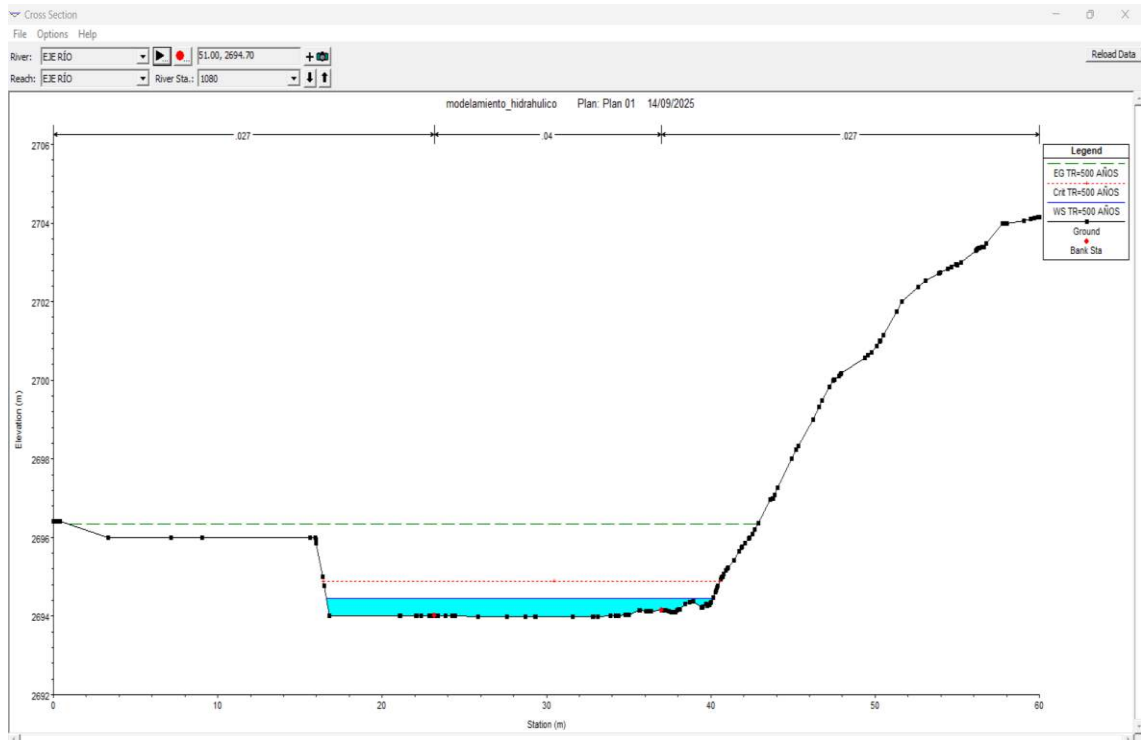
*Vista 2 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR-500 años)*



*Nota.* Vista de perfil del modelamiento

**Figura 65**

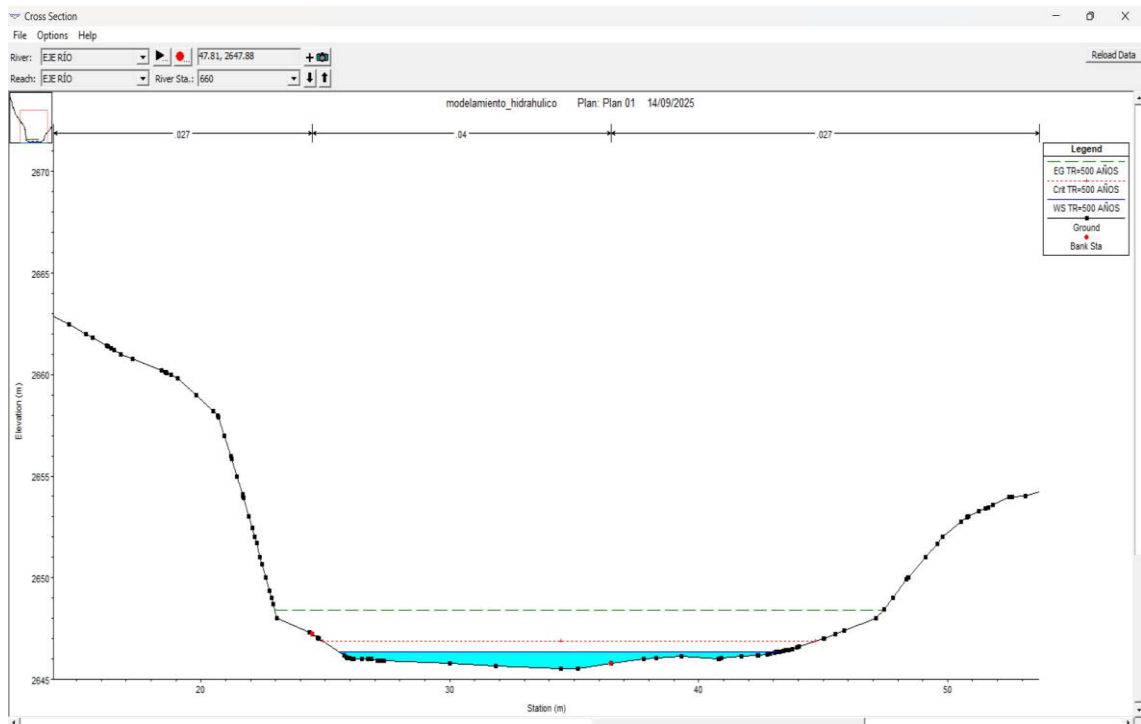
*Sección transversal 1 de simulación de inundación (TR=500 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 0+160 KM

**Figura 66**

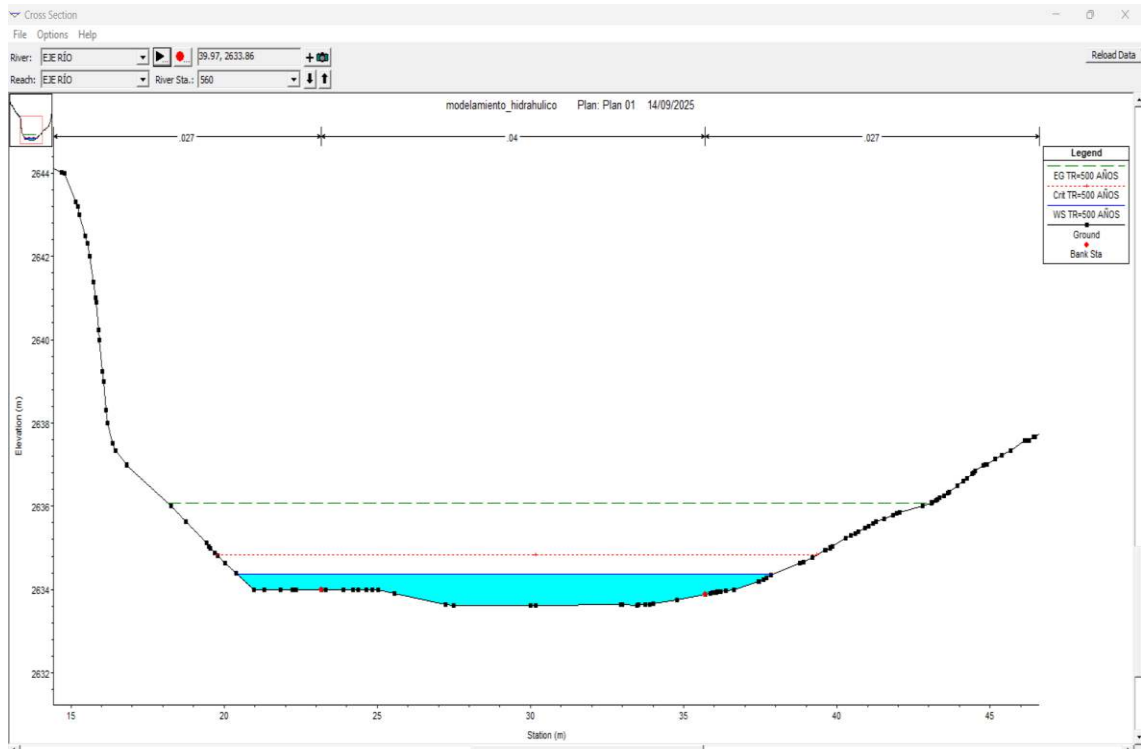
*Sección transversal 2 de simulación de inundación (TR=500 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 0+580 KM

**Figura 67**

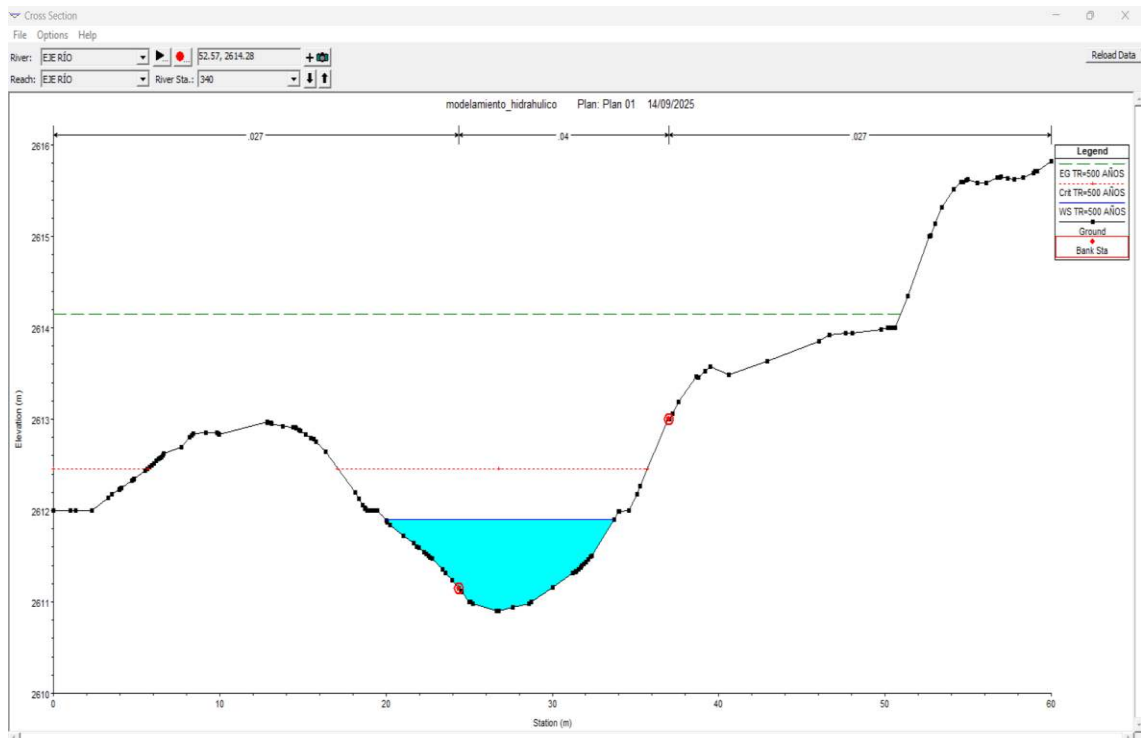
*Sección transversal 3 de simulación de inundación (TR=500 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 0+680 KM

**Figura 68**

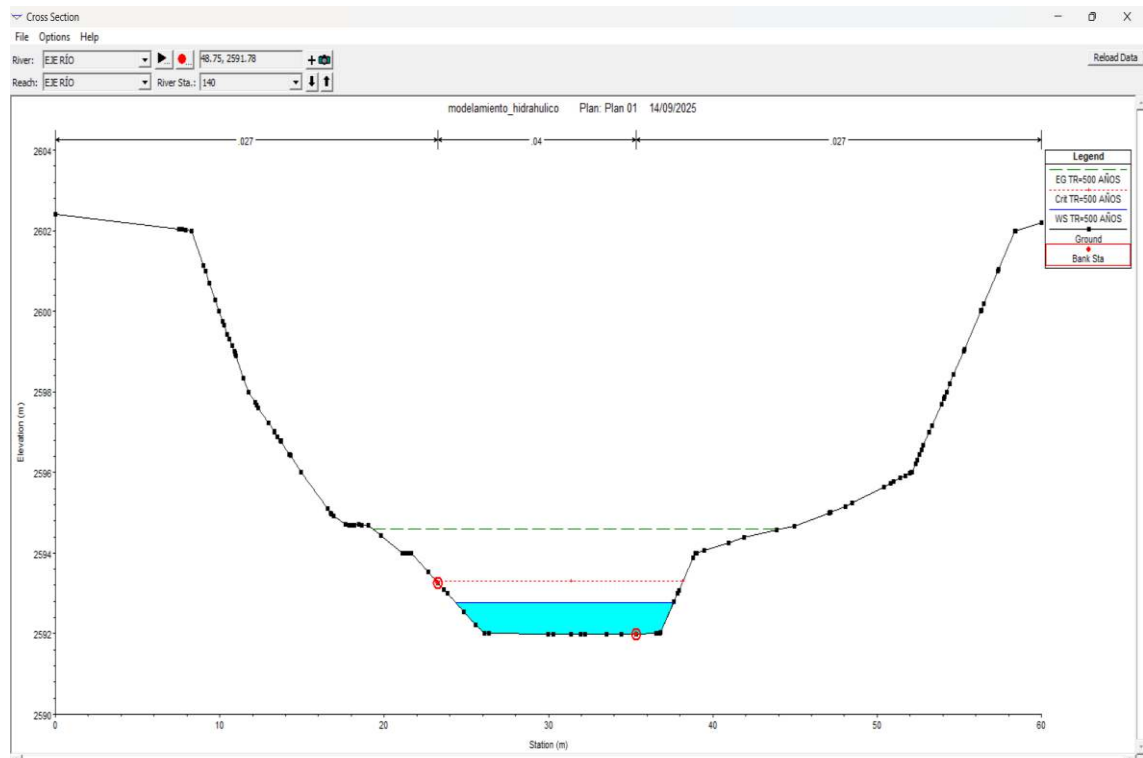
*Sección transversal 4 de simulación de inundación (TR=500 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 0+900 KM

**Figura 69**

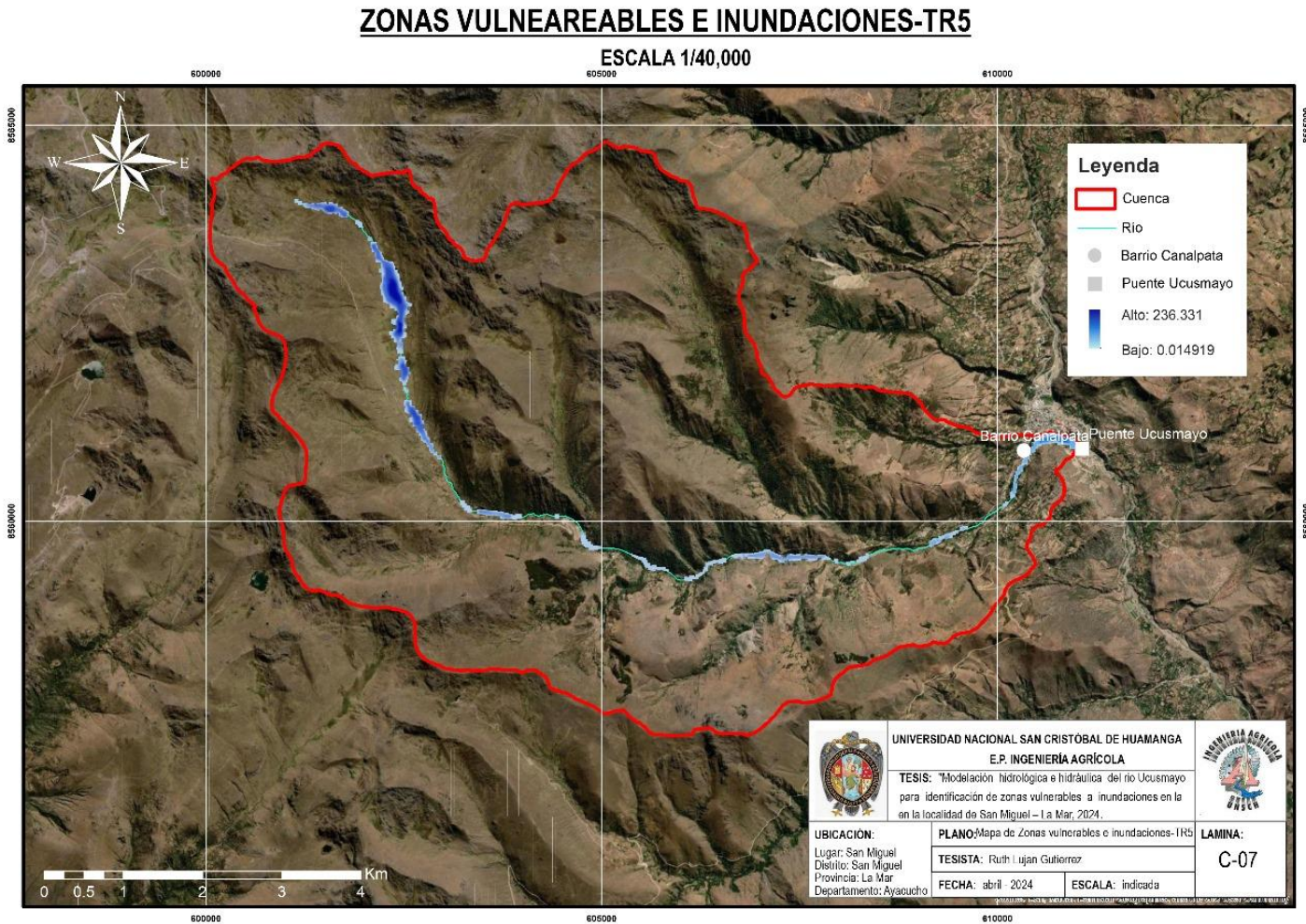
*Sección transversal 5 de simulación de inundación (TR=500 años)*



*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 1+100 KM

**Figura 70**

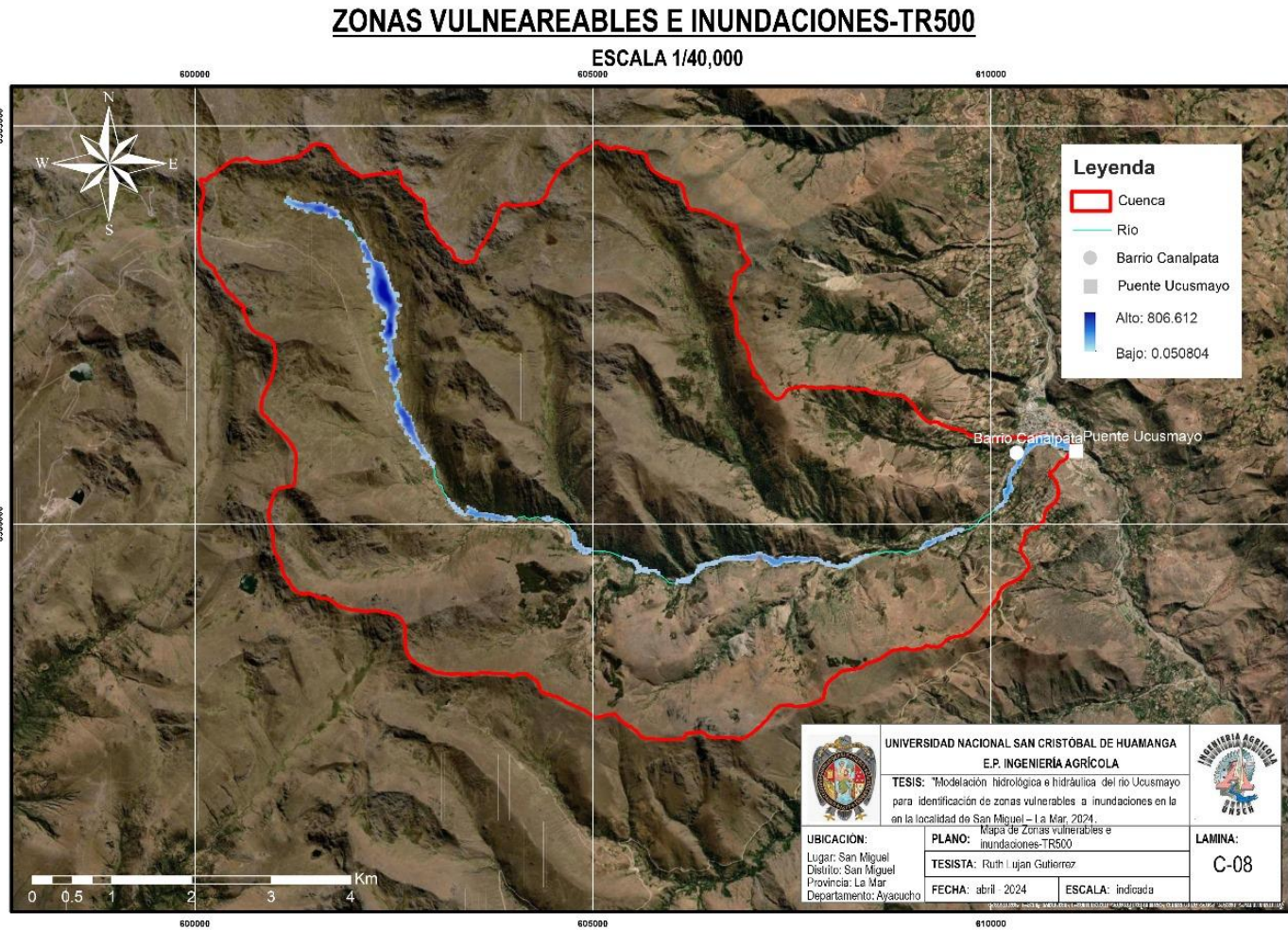
*Mapa de zonas vulnerables a inundaciones - TR 5 años*



*Nota.* Resultado final de modelamiento, se presenta mapa de riesgos de la cuenca para un tiempo de retorno de 5 años.

Figura 71

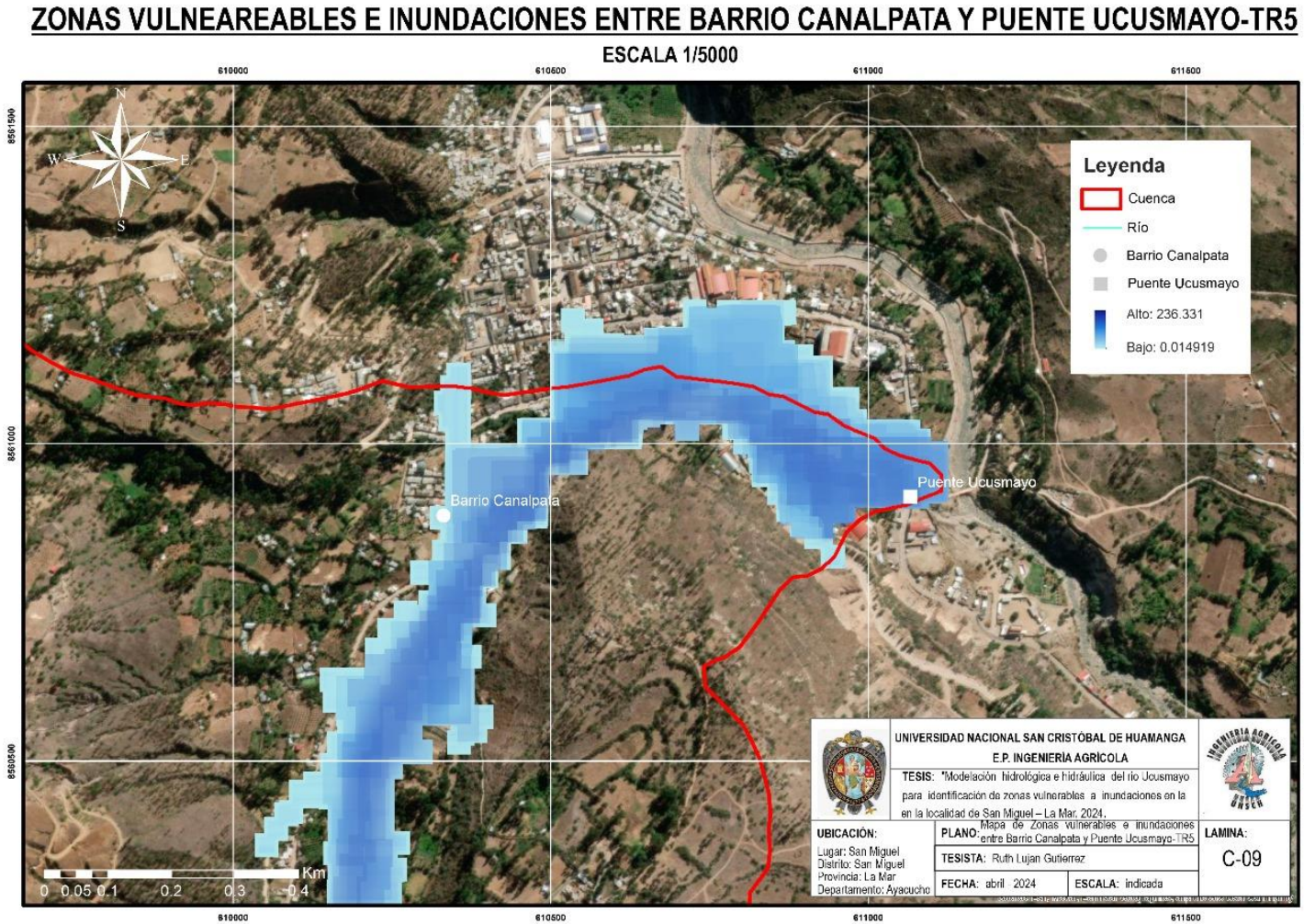
Mapa de zonas vulnerables a inundaciones - TR 500 años



Nota. Resultado final de modelamiento, se presenta mapa de riesgos de la cuenca para un tiempo de retorno de 500 años.

Figura 72

Zonas vulnerables a inundaciones en área de estudio - TR 5 años

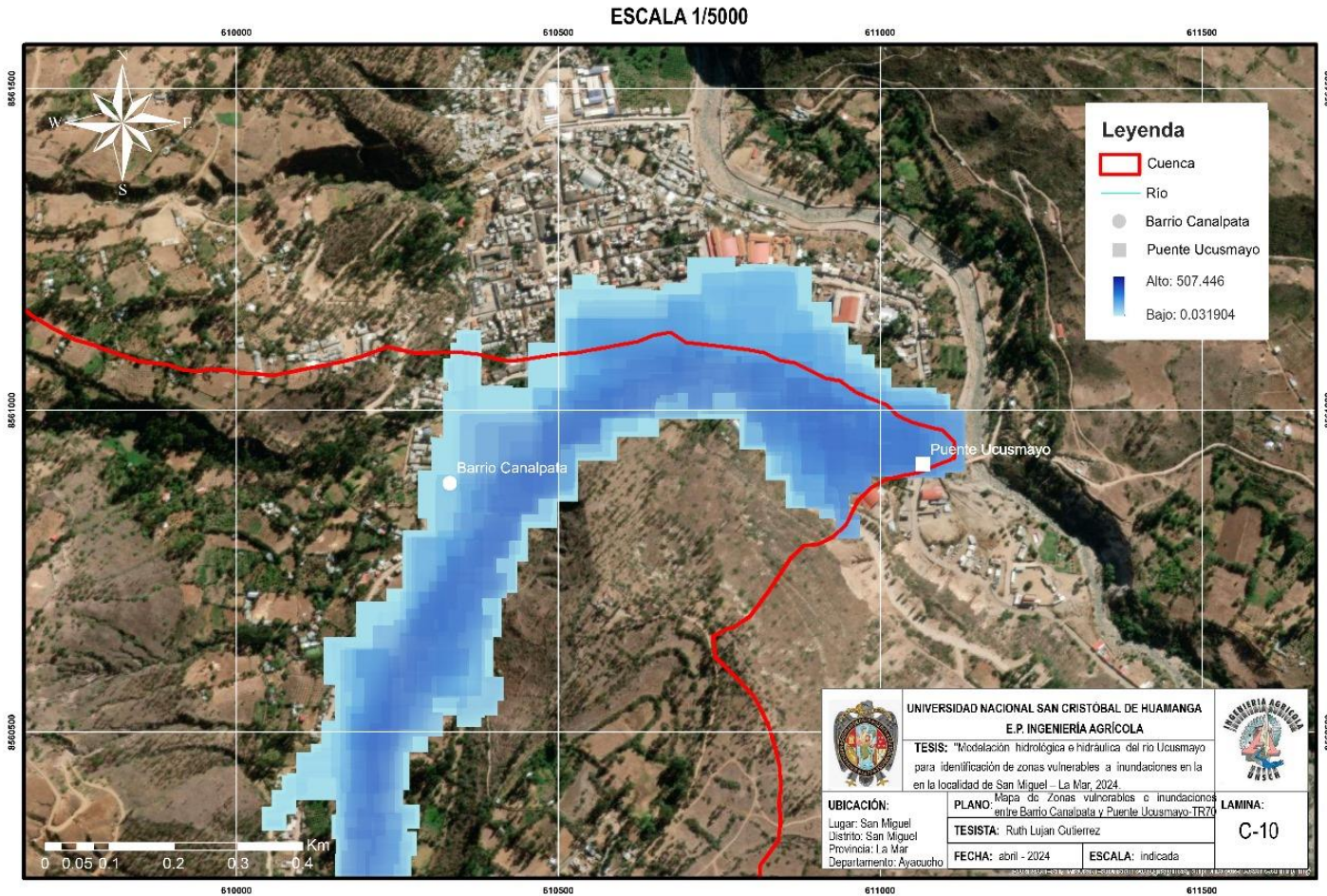


Nota. Se presenta mapa de riesgos de la zona (Barrio Canalpata y puente Ucumayo) para un tiempo de retorno de 5 años.

**Figura 73**

*Zonas vulnerables a inundaciones en área de estudio - TR 70 años*

**ZONAS VULNEAREABLES E INUNDACIONES ENTRE BARRIO CANALPATA Y PUENTE UCUSMAYO-TR70**

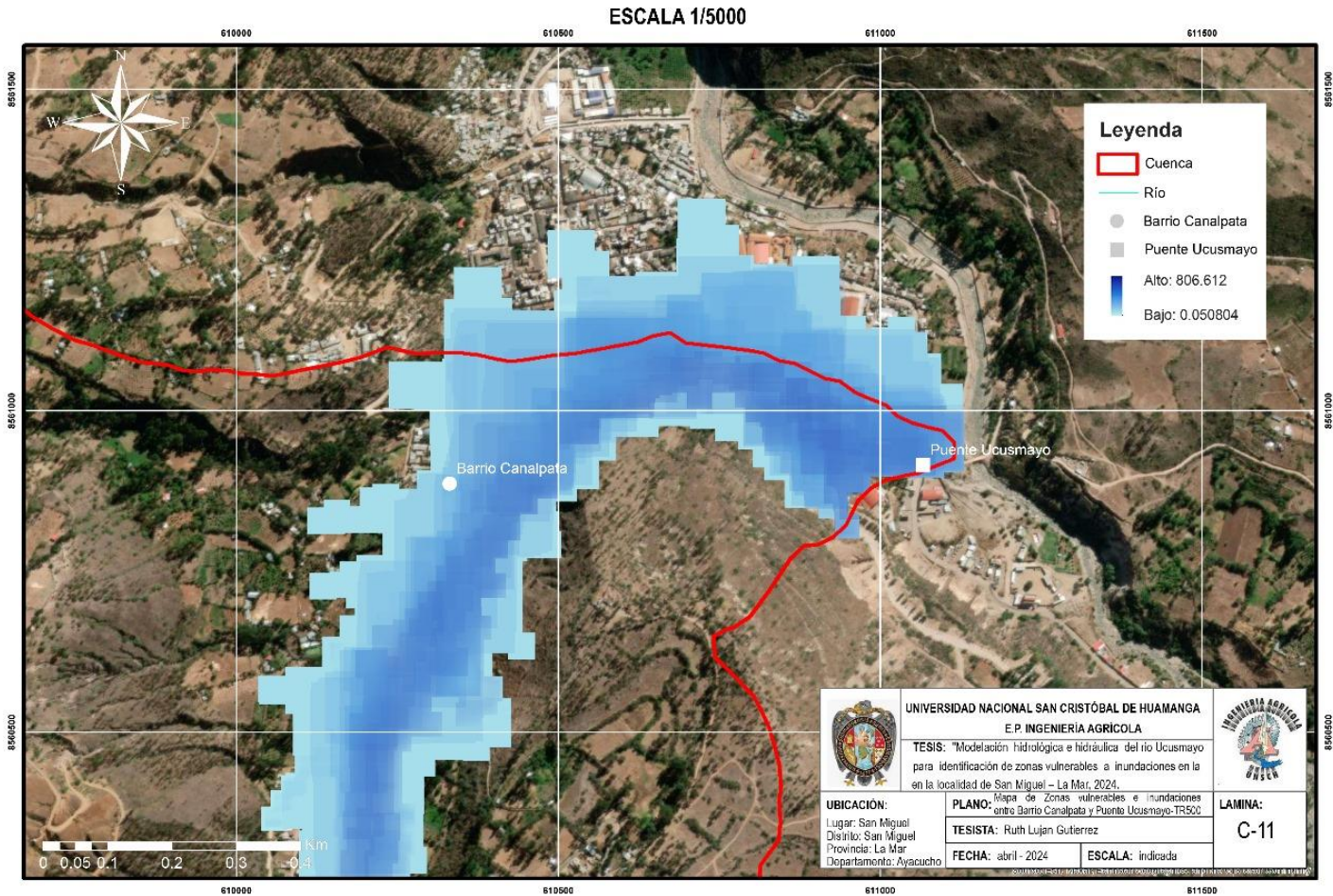


*Nota.* Se presenta mapa de riesgos de la zona (Barrio Canalpata y puente Ucsmayo) para un tiempo de retorno de 70 años.

Figura 74

Zonas vulnerables a inundaciones en área de Estudio - TR 500 años

### ZONAS VULNEAREABLES E INUNDACIONES ENTRE BARRIO CANALPATA Y PUENTE UCUSMAYO-TR500



Nota. Se presenta mapa de riesgos de la zona (Barrio Canalpata y puente Ucumayo) para un tiempo de retorno de 500 años.

En base a las inundaciones generadas, se pudo determinar un área posiblemente inundada, incluyendo al río, de:

**Tabla 32**

*Posibles áreas de inundación entre Barrio Canalpata y puente Ucusmayo*

<b>Periodo de Retorno (TR)</b>	<b>Área Inundada (m<sup>2</sup>)</b>
5 años	98,967
70 años	114,890
500 años	227,189

*Nota.* Áreas de inundación en la zona de estudio

El análisis del mapa de inundación correspondiente al periodo de retorno de 70 años, asociado a un caudal máximo estimado de 34.6 metros cúbicos por segundo, permite visualizar con mayor claridad el comportamiento extremo del río Ucusmayo y su impacto potencial sobre el entorno físico y urbano de la localidad de San Miguel. Esta condición hidrológica representa un escenario de riesgo elevado, útil no solo como referencia para estudios hidráulicos, sino también como insumo técnico clave en la planificación de proyectos de defensas ribereñas.

El modelado hidráulico permitió delimitar con precisión las áreas susceptibles a inundación para este escenario. Se observa una expansión considerable de la lámina de agua fuera del cauce natural, especialmente en tramos donde la sección hidráulica es reducida o donde existen interferencias que limitan la conducción eficiente del flujo. Las zonas más afectadas corresponden a áreas con pendiente suave y márgenes debilitadas, particularmente en las proximidades del barrio Canalpata y el puente Ucusmayo. En estos sectores, el agua supera con facilidad los bordes del cauce, extendiéndose lateralmente sobre superficies agrícolas y, en menor medida, zonas residenciales.

La superficie total de inundación estimada para este evento alcanza los 114,890 metros cuadrados, lo cual representa un incremento significativo respecto a escenarios de menor recurrencia. Asimismo, se ha identificado un aumento en la profundidad del flujo y en el ancho de la lámina de agua, lo que refleja una pérdida notable de la capacidad de conducción del río. En algunos puntos críticos, esta pérdida se aproxima al cuarenta por ciento, comparada con el comportamiento hidráulico registrado en eventos de retorno menor, como el de cinco años. Este dato pone de manifiesto que el cauce actual no cuenta con la capacidad suficiente para contener adecuadamente un caudal de esta

magnitud, y que las áreas aledañas quedarían severamente expuestas en caso de presentarse una avenida de esta naturaleza.

Desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica y de la gestión del riesgo, este tipo de modelado resulta de suma utilidad para el diseño y dimensionamiento de obras de defensa ribereña. La caracterización del evento para 70 años permite establecer cotas mínimas de protección y determinar parámetros críticos como las alturas de diseño de muros de contención, la longitud y ubicación de diques, o el trazado de canales artificiales. Asimismo, es posible definir franjas de servidumbre hidráulica y proponer restricciones al uso del suelo en las zonas de mayor vulnerabilidad. En este sentido, el análisis permite identificar con precisión las secciones del río donde la intervención estructural es prioritaria, ya sea por la alta concentración de población o por la presencia de infraestructuras esenciales en riesgo.

Además, este escenario extremo proporciona una base técnica sólida para sustentar decisiones de planificación territorial y gestión ambiental en la cuenca. Su integración en los planes de ordenamiento puede contribuir a evitar futuras ocupaciones informales en zonas expuestas, y facilitar procesos de reubicación o adecuación de infraestructuras existentes. En ausencia de defensas adecuadas, un evento de esta magnitud tendría consecuencias potencialmente catastróficas tanto en términos económicos como sociales, especialmente si se considera que las dinámicas climáticas actuales podrían aumentar la frecuencia o intensidad de este tipo de fenómenos.

#### **4.4. Discusión de resultados**

**Respecto a la regionalización hidrológica** desarrollada en la cuenca del río Ucumayo, esta ha permitido identificar y delimitar con precisión el área de estudio, estableciendo su ubicación dentro del departamento de Ayacucho, provincia de La Mar, y su relación con la cuenca mayor del río Torobamba. Este nivel de detalle es comparable al alcanzado por Santillán (2022) en su investigación sobre la cuenca del río Chalaco, donde también se realizó un análisis geomorfológico para caracterizar la cuenca. En ambos estudios se consideraron criterios físicos del terreno y aspectos fisiográficos como base para el modelado hidrológico posterior.

La recopilación y tratamiento de la información meteorológica se apoyó en datos provenientes de cuatro estaciones pluviométricas, cuyas ubicaciones fueron georreferenciadas en función de su proximidad a la cuenca. Este enfoque guarda similitud con lo realizado por Silvera y Mendoza (2022), quienes utilizaron información meteorológica proveniente de varias estaciones para caracterizar la cuenca del río

Chumbao. En el caso del río Ucusmayo, además de la recopilación, se efectuó un proceso de validación y corrección mediante el método de la curva de doble masas, lo que permitió corregir valores inconsistentes y completar series faltantes. Este procedimiento añadió un nivel de precisión que fortalece la base de datos hidrológica, asegurando coherencia temporal y espacial.

La metodología implementada en el presente estudio para el procesamiento y análisis topográfico de la cuenca se apoyó fuertemente en herramientas geoespaciales mediante el uso de programa especializado como ArcGIS. A través de modelos digitales de elevación (DEM), se generó la red de drenaje, se clasificó el orden de los ríos y se identificaron las subcuencas contribuyentes mediante operaciones como el llenado de depresiones, la dirección de flujo y la acumulación de flujo. Esta aplicación técnica es comparable a lo desarrollado por Flores (2023), quien en su análisis de la Quebrada del Diablo también identificó puntos críticos y delimitó zonas vulnerables a partir del comportamiento del terreno y de los escurrimientos superficiales.

Además, la clasificación jerárquica de los cauces mediante el método de Strahler facilitó el entendimiento de la estructura fluvial de la cuenca del río Ucusmayo, permitiendo una mejor interpretación de la dinámica hídrica en función de la conectividad de los cursos de agua. Este nivel de análisis estructural no fue abordado con el mismo detalle en los antecedentes revisados, lo cual posiciona a este estudio como una contribución significativa en términos de precisión y profundidad en la caracterización de redes hídricas.

Respecto a la **estimación de caudales máximos** se menciona lo siguiente: la presente investigación evidencia una adecuada modelación hidrológica de la cuenca del río Ucusmayo, reflejada en la estimación de caudales máximos para múltiples periodos de retorno, desde los 5 hasta los 500 años, alcanzando un caudal pico máximo de 55 m<sup>3</sup>/s. Estos valores fueron determinados mediante la simulación en HEC-HMS, utilizando como insumos datos de precipitación regionalizados, curvas IDF y parámetros morfométricos derivados del DEM, así como parámetros hidrológicos como el número de curva (CN=74) y el lag time (25.37 min).

Estos resultados son coherentes y metodológicamente comparables con lo encontrado por Vera (2015), quien utilizó también HEC-HMS junto con HEC-RAS e Íber para estimar y propagar caudales máximos en el río Bogotá. Al igual que en este estudio, Vera empleó una secuencia metodológica que comienza con la caracterización hidrológica de la cuenca, seguida de la simulación de eventos de lluvia intensos

mediante hietogramas. Ambos estudios destacan la importancia de estimar con precisión los caudales máximos para la identificación de zonas vulnerables a inundaciones, aunque la presente investigación se enfocó en una cuenca más pequeña y montañosa, mientras que Vera abordó una cuenca más extensa.

Por otro lado, Aguilar (2010) estimó caudales máximos para el río Machángara utilizando la intensidad de lluvias y las condiciones geomorfológicas del cauce. Aunque no menciona el uso de HEC-HMS, su enfoque basado en los periodos de retorno (50, 100 y 200 años) guarda similitud conceptual con esta investigación. En ambos casos, se resalta la relevancia de considerar la intensidad y distribución temporal de las precipitaciones para modelar adecuadamente el comportamiento hidrológico. No obstante, la presente investigación aplicó una metodología más robusta y actualizada, incorporando curvas IDF desarrolladas a partir del método de Dick y Peschke, así como una validación estadística de distribuciones de probabilidad para las precipitaciones, concluyendo que la distribución Gamma fue la más representativa para la cuenca del Ucusmayo.

Además, la incorporación del análisis morfométrico y el uso de herramientas GIS como QGIS permitió una caracterización precisa de la cuenca, algo que no se detalla en los antecedentes revisados. En particular, se identificó un tiempo de concentración corto y una pendiente elevada, factores que explican la rápida respuesta hidrológica y los altos caudales pico observados incluso en eventos con periodos de retorno moderados (por ejemplo, 26.4 m<sup>3</sup>/s para 25 años).

Respecto a **la identificación de zonas vulnerables a inundaciones** se precisa lo siguiente:

La modelación hidráulica desarrollada en esta investigación permitió identificar zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel, específicamente en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucusmayo. A través del uso de herramientas como HEC-RAS y HEC-GeoRAS, y partiendo de un Modelo Digital de Elevación (DEM), se simularon escenarios de inundación para periodos de retorno de 5, 70 y 500 años. Los resultados evidenciaron un aumento progresivo en el área afectada conforme se incrementa el periodo de retorno, alcanzando una superficie inundada máxima de 227,189 m<sup>2</sup> para el evento de 500 años.

Estos hallazgos son comparables con los de Vera (2015), quien utilizó una metodología similar en el río Bogotá para identificar zonas vulnerables en el casco urbano de Villapinzón. Al igual que en el presente estudio, Vera empleó HEC-RAS para simular la

propagación del flujo bajo diferentes escenarios de caudales pico, lo que le permitió delimitar áreas de riesgo, incluyendo infraestructuras críticas como viviendas, vías y terrenos agrícolas. En nuestro caso, aunque el foco fue una localidad rural de menor escala, se logró determinar con precisión sectores expuestos a desbordes mediante mapas espaciales en ArcGIS, particularmente en zonas urbanizadas cercanas al cauce.

Asimismo, se identifica un paralelismo metodológico con Aguilar (2010), quien analizó la vulnerabilidad a inundaciones en el río Machángara. Aguilar también destacó el impacto de las lluvias intensas y la influencia de caídas abruptas del terreno, lo cual incrementa el riesgo de erosión e inundación en áreas urbanas adyacentes. En la cuenca del río Ucusmayo, las pendientes elevadas y la respuesta rápida del sistema hidrológico —confirmada por un tiempo de concentración muy corto— también aumentan la probabilidad de eventos críticos, incluso para periodos de retorno moderados.

La principal contribución diferenciadora del presente estudio frente a los antecedentes citados radica en la combinación integral de modelamiento hidrológico y modelamiento hidráulico en una escala local, complementada con el análisis detallado de parámetros morfométricos y la generación de curvas IDF personalizadas. Esta aproximación permitió no solo simular caudales máximos con HEC-HMS, sino también visualizar de manera tridimensional la propagación del flujo en HEC-RAS y mapear áreas de riesgo de forma precisa. El enfoque empleado refuerza la aplicabilidad de estas herramientas para la gestión del riesgo hídrico en localidades rurales de topografía compleja, como San Miguel.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES

- 1- La regionalización hidrológica de la cuenca del río Ucusmayo permitió caracterizar con precisión la precipitación mediante la integración de datos de estaciones meteorológicas, validados con la curva de doble masas. La delimitación de la cuenca, el análisis de la red de drenaje y el modelo digital de elevación facilitaron comprender la variabilidad espacial de las lluvias. Se evidenció una alta variabilidad altitudinal y una distribución heterogénea de la precipitación, obteniéndose valores máximos diarios entre 21.10mm y 46.80 mm, información clave para la gestión del recurso hídrico.
- 2- La estimación de caudales máximos con el modelo hidrológico HEC-HMS permitió simular la respuesta del río Ucusmayo frente a lluvias extremas. Se emplearon precipitaciones derivadas de distribución Gamma, curvas IDF y hietogramas de bloques alternos, además de parámetros físicos como  $CN = 74$ , tiempo de concentración = 0.70 h y abstracción inicial = 17.85 mm. Los caudales pico oscilaron entre 16.2 m<sup>3</sup>/s (T=5 años) y 55 m<sup>3</sup>/s (T=500 años), mostrando una cuenca de respuesta rápida y vulnerable, lo que confirma la utilidad del modelado hidrológico para la gestión del riesgo de inundaciones en San Miguel.
- 3- La modelación hidráulica con HEC-RAS permitió identificar las zonas vulnerables a inundaciones en el río Ucusmayo. Se observó que el área inundada aumenta con el periodo de retorno, alcanzando 227,189 m<sup>2</sup> para 500 años. Los sectores más críticos se ubican entre Canalpata y el puente Ucusmayo, donde se evidenció pérdida de capacidad del cauce. En el escenario de 70 años, con un caudal de 34.6 m<sup>3</sup>/s, se registró una expansión significativa de la lámina de agua. Estos resultados resaltan la necesidad de implementar medidas de protección estructural y gestión del riesgo en la zona.
- 4- En conclusión, el estudio integró la regionalización pluviométrica, HEC-HMS y HEC-RAS, logrando caracterizar la amenaza hidrológica e identificar zonas vulnerables, sobre todo en el tramo Canalpata–puente Ucusmayo. El escenario de 70 años ( $Q_p=34.6$  m<sup>3</sup>/s) confirmó un riesgo alto por expansión de la inundación. Se recomienda implementar defensas ribereñas y diques, además de medidas preventivas y de gestión del riesgo, sustentadas en esta base técnica sólida.

## **CAPÍTULO VI**

### **RECOMENDACIONES**

- 1- Se recomienda mantener y ampliar el monitoreo pluviométrico en la cuenca, incorporando estaciones adicionales en sectores estratégicos para mejorar la resolución espacial de los datos. Asimismo, se sugiere actualizar periódicamente la base de datos meteorológica y continuar aplicando métodos de validación estadística que aseguren la calidad de la información hidrológica, fortaleciendo así futuras modelaciones y decisiones de ordenamiento territorial en la cuenca del río Ucumayo.
- 2- Se recomienda que las autoridades locales y organismos de gestión del riesgo utilicen los caudales máximos estimados como base técnica para diseñar infraestructuras hidráulicas resistentes, como canales de derivación, muros de contención y drenajes pluviales. Además, es fundamental incorporar estos datos en los planes de ordenamiento territorial, priorizando zonas con alta exposición al escurrimiento superficial, con el fin de reducir daños ante lluvias intensas y proteger a la población y sus actividades económicas.
- 3- Se sugiere implementar un sistema de monitoreo hidrometeorológico en tiempo real y actualizar periódicamente los modelos hidráulicos para mejorar la precisión de los mapas de inundación. Igualmente, es necesario establecer medidas estructurales y no estructurales de mitigación en las zonas críticas identificadas, como Canalpata y el puente Ucumayo, incluyendo señalización de zonas de riesgo, reubicación preventiva y capacitación comunitaria. Estas acciones permitirán una respuesta oportuna ante eventos extremos y fortalecerán la resiliencia de la localidad.
- 4- Como recomendación general, se sugiere a las autoridades incorporar los resultados del estudio en los planes de ordenamiento territorial y gestión del riesgo de San Miguel. Es prioritario implementar medidas de protección en zonas vulnerables, como Canalpata y el puente Ucumayo, mediante obras de defensa ribereña y drenaje pluvial. Asimismo, se recomienda actualizar periódicamente los modelos hidrológicos e hidráulicos y fortalecer el monitoreo y la educación comunitaria. Estas acciones permitirán una gestión más efectiva del riesgo de inundaciones y una mejor planificación frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

## REFERENCIAS

- Aguilar, A. (2010). *Modelación hidrológica de crecidas en la cuenca del río Machángara en la ciudad de Quito*. [Tesis de licenciatura, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio institucional de la EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2212>
- AgroPerú (2025). *Perú registró eventos climáticos extremos en 2024*. API. <https://www.agroperu.pe/peru-registro-eventos-climaticos-extremos-en-2024/?utm>
- Aquaveo. (2021). *Watershed Modeling System (WMS) 11.0*. Provo, Utah: Aquaveo LLC. <https://www.aquaveo.com/software/wms>
- Autodesk. (2022). *Autodesk Civil 3D (Versión 2023)* [Computer software]. Autodesk Inc. <https://www.autodesk.com/products/civil-3d/>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2022). *Informe técnico: Evaluación de riesgos hidrológicos en cuencas altoandinas*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. [https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/file\\_content/05\\_MEMORIA%20ANUAL%202022\\_Final\\_0.pdf](https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/file_content/05_MEMORIA%20ANUAL%202022_Final_0.pdf)
- Brunner, M. I., Slater, L., Tallaksen, L. M., & Clark, M. (2021). Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review. *WIREs Water*, 8(3), e1520. <https://doi.org/10.1002/wat2.1520>
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). (2023). *Informe estadístico de emergencias por fenómenos naturales en el Perú (2003-2023)*. <https://www.gob.pe/institucion/cenepred/informes-publicaciones>
- Chereque, W. (1991). Hidrología (segunda). *Pontificia Universidad Católica del Perú*. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5662>
- Cotler, H., Galindo, A., González, I., Pineda, R., & Ríos, E. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. *Cuadernos de Divulgación ambiental, México, DF., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable/Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas*. <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/4971>
- EOS Data Analytics. (s. f.). *Modelo Digital de Elevación (DEM) de la cuenca del río Ucusmayo* [Dataset]. LandViewer. Recuperado el 3 de marzo de 2025 de <https://eos.com/landviewer/>

- Esri. (2022). *ArcGIS Pro* (Versión 3.0) [Computer software]. Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.com/arcgis>
- Flores, D. (2023). *Modelamiento hidráulico para determinar el predimensionamiento de diques de encauzamiento en la Quebrada del Diablo, Región Tacna* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio institucional de la UNJBG. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3408863>
- Google. (2023). *Google Earth Pro* (Versión 7.3) [Computer software]. Google LLC. <https://www.google.com/earth/>
- Gutierrez, C. (2014), *Hidrología Básica y Aplicada*. Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6758>
- Hernández. R. (2014). Metodología de la investigación (6o Edición). *Mexico: Mc Graw - Hill Interamericana*.
- Hou, X., Zhao, Y., Liu, Y., Yang, Z., Wang, K., Li, L., Luo, X., Lo, D., Grundy, J., & Wang, H. (2024). Large Language Models for Software Engineering: A Systematic Literature Review. *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, 33(8), 220:1-220:79. <https://doi.org/10.1145/3695988>
- Instituto Nacional de Recursos Hídricos de Grecia. (2010). *Hydrognomon – Hydrological time series analysis and processing software application*. <https://hydrognomon.openmeteo.org/?utm>
- Keller, A. A., Garner, K., Rao, N., Knipping, E., & Thomas, J. (2023). Hydrological models for climate-based assessments at the watershed scale: A critical review of existing hydrologic and water quality models. *Science of The Total Environment*, 867, 161209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161209>
- National Technical University of Athens. (2020). *Hydrognomon* (Versión 4.1) [Computer software]. ITIA Research Team. <http://www.hydrognomon.org>
- Medina, J., Blas, F. (2021). *Modelamiento hidrológico e hidráulico del río Yuracyacu para identificar zonas vulnerables por máximas avenidas, ciudad Nueva Cajamarca – San Martín*. UCSS. <https://hdl.handle.net/20.500.14095/1073>
- Mignot, E., & Dewals, B. (2022). Hydraulic modelling of inland urban flooding: Recent advances. *Journal of Hydrology*, 609, 127763. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127763>

- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (s. f.). Zonificación Ecológica Económica (ZEE) de Ayacucho – Mapa edafológico [Mapa]. Geoportal MINAM. <https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/ayacucho/>
- Organización Meteorológica Mundial. (2020), *Terminos hidrológicos*. Organización Meteorológica Mundial. [https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/13928/1/Boletin\\_OMM\\_70\\_2\\_%283%29.pdf](https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/13928/1/Boletin_OMM_70_2_%283%29.pdf)
- Pandi, D., Kothandaraman, S., & Kuppusamy, M. (2021). Hydrological models: A review. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 12(3), 223-242. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2021.117540>
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). (2021). *Cambio climático 2021: Bases físicas*. Contribución del Grupo de trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cambridge University Press. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SPM\\_Spanish.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf)
- QGIS Development Team. (2023). *QGIS Geographic Information System* (Versión 3.28) [Computer software]. Open-Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org>
- Regenwetter, L., Nobari, A. H., & Ahmed, F. (2022). Deep Generative Models in Engineering Design: A Review. *Journal of Mechanical Design*, 144(071704). <https://doi.org/10.1115/1.4053859>
- Russo, D., & Stol, K.-J. (2021). PLS-SEM for Software Engineering Research: An Introduction and Survey. *ACM Comput. Surv.*, 54(4), 78:1-78:38. <https://doi.org/10.1145/3447580>
- Sahu, M. K., Shwetha, H. R., & Dwarakish, G. S. (2023). State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: A review. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(3), 3029-3051. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01704-7>
- Santillan, L. (2022). *Modelación hidrológica e hidráulica del Río Chalaco, para el diseño de Puente Chalaco, cuenca Medio Alto Piura* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio institucional de la UNALA. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5662>

- Schwenzer, M., Ay, M., Bergs, T., & Abel, D. (2021). Review on model predictive control: An engineering perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(5), 1327-1349. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07682-3>
- Silvera, E., y Mendoza, M. (2022). *Determinación de superficie de inundación del río Chumbao en el distrito de San Jerónimo, mediante el modelo numérico HEC-RAS* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana Unión]. Repositorio institucional de la UPU. <http://hdl.handle.net/20.500.12840/5686>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2012). *HEC-GeoRAS, GIS Tools for Support of HEC-RAS* (Versión 10.2) [Computer software]. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2021). *HEC-HMS Hydrologic Modeling System* (Versión 4.9) [Computer software]. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2021). *HEC-RAS River Analysis System* (Versión 6.0) [Computer software]. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., & Ortiz, L. (2019), *Cuenca Hidrográficas*. Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19038/1/Cuencas%20hidrogr%C3%A1ficas.pdf>
- Vélez, M. (2000), *Hidrología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia. <https://bit.ly/48Hpdpq>
- Vera, D. (2015). Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en la cuenca alta del Río Bogotá, en el Municipio de Villapinzón, utilizando modelación hidrológica HEC-HMS e hidráulica 1D y 2D HEC-RAS e ÍBER [Tesis de maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. Repositorio institucional de la ECIJG. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/186>
- Villón, M. (2004), *Hidrología*. MaxSoft. <https://es.scribd.com/document/414668809/Hidrologia-by-Maximo-Villon-pdf>

## LISTA DE ABREVIATURAS

---

<b>Abreviatura / Acrónimo</b>	<b>Significado</b>
ANA	Autoridad Nacional del Agua
DGHA	Dirección General de Hidrología y Asuntos Ambientales
GIS	Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica)
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System
IDF	Intensidad – Duración – Frecuencia
IGP	Instituto Geofísico del Perú
IGN	Instituto Geográfico Nacional
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
LIDAR	Light Detection and Ranging
MAX24HR	Precipitación máxima registrada en 24 horas
MDE	Modelo Digital de Elevación
mm	Milímetros
m <sup>3</sup> /s	Metros cúbicos por segundo
Q <sub>máx</sub>	Caudal máximo
Q <sub>p</sub>	Caudal pico
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TR	Tiempo de Retorno
UNSCH	Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga
UTM	Universal Transverse Mercator (Sistema de Coordenadas UTM)

---

## GLOSARIO

**Avenida:** Incremento rápido y temporal del caudal en un río o quebrada, producido principalmente por lluvias intensas, que puede generar desbordes o inundaciones.

**Calibración hidrológica:** Proceso mediante el cual se ajustan los parámetros de un modelo hidrológico hasta que sus resultados se asemejen a los datos observados.

**Caudal:** Volumen de agua que pasa por una sección transversal de un río en una unidad de tiempo, generalmente expresado en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ).

**Curva IDF:** Relación matemática que vincula la intensidad, duración y frecuencia de eventos de precipitación extrema, utilizada para el diseño hidrológico.

**Cuenca hidrográfica:** Unidad territorial delimitada por divisorias topográficas, donde el agua de lluvia escurre hacia un punto común de salida, como un río o lago.

**Escorrentía:** Parte del agua de precipitación que fluye sobre la superficie del suelo y llega a los cauces, sin infiltrarse en el terreno.

**HEC-HMS:** programa desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos para la simulación de procesos hidrológicos como lluvia-escorrentía en cuencas hidrográficas.

**HEC-RAS:** Programa computacional que permite modelar el flujo de agua en ríos y canales naturales o artificiales, tanto en condiciones permanentes como no permanentes.

**Isoyetas:** Líneas en un mapa que conectan puntos con igual valor de precipitación acumulada, utilizadas para representar la distribución espacial de las lluvias.

**Modelo Digital de Elevación (MDE):** Representación tridimensional de la superficie del terreno, utilizada para el análisis topográfico e hidrológico.

**Precipitación:** Caída de agua desde la atmósfera en forma líquida o sólida (lluvia, nieve, granizo), medida generalmente en milímetros.

**Rugosidad de Manning:** Parámetro que representa la resistencia al flujo de agua en un cauce, en función del tipo de superficie y vegetación del lecho del río.

**Regionalización hidrológica:** Proceso mediante el cual se estiman parámetros hidrológicos en áreas sin información directa, utilizando datos de estaciones vecinas con características similares.

**Simulación hidráulica:** Reproducción virtual del comportamiento del flujo de agua en un cauce natural o artificial, a fin de analizar niveles, velocidades y zonas de inundación.

**Tiempo de retorno (TR):** Período estadístico promedio entre eventos hidrológicos de igual o mayor magnitud, utilizado en el diseño de infraestructuras hidráulicas.

**Vulnerabilidad:** Grado de susceptibilidad que presenta una zona o sistema ante el impacto de un evento adverso, como una inundación.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p><b>Problema General</b> ¿La modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y puente Ucumayo de la localidad de San Miguel, permitirá identificar las zonas vulnerables a inundaciones?</p>	<p><b>Objetivo General</b> Identificar las zonas vulnerables a inundaciones a través de la modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y puente Ucumayo de la localidad de San Miguel.</p>	<p><b>Hipótesis General</b> La modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y puente Ucumayo de la localidad de San Miguel, permitirá identificar las zonas vulnerables a inundaciones.</p>	<p><b>Variable independiente</b> Modelación hidrológica e hidráulica</p> <p><b>Variable dependiente</b> Zonas vulnerables a inundaciones</p>	<p><b>Indicadores independientes</b> Precipitación (mm) Intensidad (mm/hora) Tiempo de retorno Parámetros geomorfológicos de la cuenca Caudal (m<sup>3</sup>/s) Tirante (m) Área de la sección transversal (m<sup>2</sup>) Elevación (m.s.n.m)</p> <p><b>Indicadores dependientes</b> Ubicación UTM Tipo de construcción (rústico, material noble, etc.) Damnificados Extensión de terreno (ha)</p>	<p>Enfoque de investigación: Explicativo Nivel de investigación: Explicativo, transversal Población: Río Ucumayo (7.17 km) Muestra: Tramo vulnerable a inundaciones (1.140 km entre barrio Canalpata y puente Ucumayo)</p>
<p><b>Problemas Específicos</b> ¿Cómo realizar la caracterización pluviométrica de la cuenca del río Ucumayo? ¿Cuáles serán los valores de caudales máximos estimados mediante el modelado hidrológico utilizando el programa HEC-HMS? ¿Cómo identificar las zonas vulnerables a inundaciones en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucumayo en la localidad de San Miguel, utilizando el programa HEC-RAS?</p>	<p><b>Objetivos Específicos</b> Realizar la regionalización hidrológica de la cuenca del río Ucumayo con fines de caracterización pluviométrica. Estimar los caudales máximos a través del modelado hidrológico utilizando el programa HEC-HMS. Identificar las zonas vulnerables a inundaciones en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucumayo en la localidad de San Miguel, utilizando el programa HEC-RAS.</p>	<p><b>Hipótesis Específicas</b> La regionalización hidrológica de la cuenca del río Ucumayo permitirá realizar la caracterización pluviométrica. El modelado hidrológico utilizando el programa HEC-HMS permitirá estimar los valores de caudales máximos. El programa HEC-RAS permitirá identificar las zonas vulnerables a inundaciones en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucumayo en la localidad de San Miguel.</p>			

## ANEXO 2: PANEL FOTOGRAFICO (IMÁGENES PROPIAS)

**Figura 75**

*Tesista evaluando el inicio del tramo en estudio prog. Km 0+000*



**Figura 76**

**Tesista reconociendo el tramo del proyecto a realizar**



**Figura 77**

*Tesista identificando instituciones educativas en peligro por inundación por el río Ucusmayo. prog. Km 0+720*



**Figura 78**

*Tesista identificando las viviendas en peligro por inundación por el río Ucusmayo. prog. Km 0+800*



**Figura 79**

*Tesista identificando las zonas inundables por el rio Ucusmayo. prog. Km 0+920*



**Figura 80**

*Tesista identificando los terrenos de cultivo inundables por la crecida del rio Ucusmayo. prog. Km 0+980*



**Figura 81**

*Medición del ancho estable del río Ucusmayo*



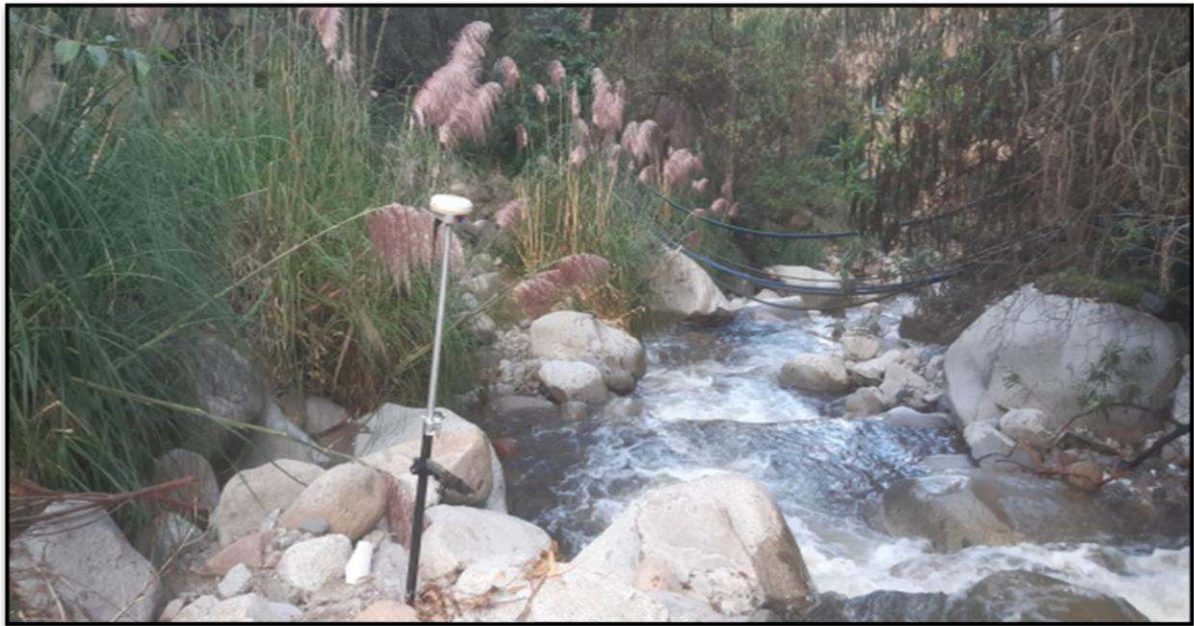
**Figura 82**

*Tesista señalando los puntos BM2, para el levantamiento topográfico. prog. Km 0+800*



**Figura 83**

*Realizando el levantamiento topográfico del rio Ucusmayo con GNSS South Galaxy G6.  
prog. Km 0+500*



**Figura 84**

*Realizando el levantamiento topográfico del rio Ucusmayo. prog. Km 0+750*



**Figura 85**

*Realizando el levantamiento topográfico del rio Ucusmayo. prog. Km 1+000*



**Figura 86**

*Tesista marcando los puntos BM1, para dar inicio el levantamiento fotogramétrico con el Drone Autel EVO2. prog. Km 0+060*



**Figura 87**

*Tesista iniciando el levantamiento topográfico con el dron prog. Km 0+060*



**Figura 88**

*Tesista realizando el levantamiento topográfico con el dron prog. Km 0+800*



**Figura 89**

*Puntos de control*



**Figura 90**

*Vista aérea del cauce del río Ucumayo e interacción con la zona urbana de San Miguel*



**Figura 91**

*Vista cenital del cauce del río Ucumayo y áreas agrícolas colindantes*



### ANEXO 3: Datos de estación La Quinua



#### REGISTRO DE PRECIPITACION MENSUAL TOTAL (mm)

Estación : **LA QUINUA** Latitud : 13° 03' 19" S Dpto : Ayacucho  
 : Precipitación Mensual Acumulada Longitud : 74° 08' 29" W Prov. : Huamanga  
 Parámetro (mm) Código : 113021 Altitud : 3,215 msnm Distrito : Quinua

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1964	174.2	167.0	157.1	8.2	1.3	3.5	10.3	1.5	85.2	29.6	14.5	67.0	719.4
1965	92.0	57.1	122.0	13.1	0.0	0.0	0.0	0.0	35.2	33.2	48.5	130.8	531.9
1966	152.1	115.1	94.0	4.0	52.0	0.0	7.0	7.0	5.0	125.5	61.0	69.0	691.7
1967	56.5	325.8	238.1	46.3	48.8	0.0	31.7	15.9	61.6	112.6	114.7	189.8	1241.8
1968	216.7	193.2	127.7	62.8	14.1	42.1	12.6	5.1	32.3	95.4	118.5	146.8	1067.3
1969	95.3	90.8	123.1	19.4	27.3	11.6	13.7	16.3	26.9	70.5	89.8	131.3	716.0
1970	354.7	100.7	104.8	0.0	34.6	12.3	8.0	0.0	48.6	19.9	35.5	91.0	810.1
1971	120.5	188.4	153.7	57.4	0.0	0.0	24.0	19.0	0.0	41.2	4.2	153.0	761.4
1972	244.9	21.6	255.6	37.2	0.0	0.0	28.2	0.0	3.2	68.8	27.5	74.3	761.3
1973	280.0	187.4	297.6	76.8	19.4	0.0	17.8	37.2	50.0	27.6	26.2	172.7	1192.7
1974	264.0	369.5	250.6	18.2	23.9	41.6	0.0	10.2	46.6	23.9	17.3	63.6	1129.4
1975	179.4	123.0	115.9	6.4	41.6	0.0	1.2	9.7	29.0	45.5	45.4	123.6	720.7
1976	176.8	178.8	149.2	25.3	33.8	17.0	5.8	11.2	75.2	11.4	14.2	75.0	773.7
1977	78.2	148.4	73.9	43.4	18.5	0.0	16.3	10.4	31.2	54.5	100.1	97.0	671.9
1978	218.9	132.0	87.2	50.6	11.5	15.0	4.9	1.4	42.9	71.7	89.9	93.8	819.8
1979	89.2	126.9	159.5	35.0	22.9	0.0	6.2	17.7	11.2	35.5	70.5	60.9	635.5
1980	116.6	82.0	198.4	56.7	98.6	3.3	0.1	6.0	26.2	79.0	82.2	73.2	822.3
1981	111.9	215.9	135.3	63.3	12.2	0.0	0.8	14.4	88.1	81.3	82.6	186.4	992.2

1982	196.3	172.7	113.1	24.2	82.2	7.4	7.1	41.2	40.8	146.8	86.5	69.9	988.2
1983	163.4	28.2	78.3	51.3	1.9	0.9	24.0	102.7	8.3	55.8	100.1	123.7	738.6
1984	137.4	309.9	148.5	62.0	20.6	16.1	12.3	1.8	19.9	61.9	22.9	158.7	972.0
1985	90.9	126.8	102.3	13.0	9.2	35.3	9.6	25.2	21.6	37.7	99.3	136.9	707.8
1986	259.5	108.1	155.2	63.3	72.3	1.4	1.7	7.6	44.5	79.3	75.3	81.0	949.2
1987	271.2	93.4	71.4	21.3	15.1	34.8	11.2	27.5	68.1	43.6	67.9	73.0	798.5
1988	156.0	153.1	91.2	39.5	29.7	0.0	16.3	15.5	16.5	15.5	52.7	133.7	719.7
1989	129.7	82.2	111.1	33.2	19.3	10.6	4.1	12.6	47.0	35.5	34.9	81.6	601.8
1990	132.5	31.5	39.6	36.9	11.4	55.4	2.4	30.9	26.6	87.4	125.2	125.8	705.6
1991	111.7	57.7	88.9	18.7	8.5	35.1	5.9	0.0	61.7	48.2	31.5	41.6	509.5
1992	97.5	109.0	73.0	35.9	0.0	21.7	8.8	33.1	8.1	61.8	52.4	50.6	551.9
1993	164.0	206.0	178.0	54.6	62.2	2.8	19.9	37.4	58.1	60.8	53.4	188.3	1085.5
1994	156.1	172.3	173.5	50.4	26.2	17.2	8.3	16.3	25.1	43.6	62.5	131.5	883.0
1995	235.8	171.7	191.5	17.8	29.4	15.9	7.6	12.1	25.0	54.2	80.1	83.9	925.0
1996	141.5	169.6	157.1	64.8	20.7	15.9	6.0	19.0	38.1	44.6	46.6	94.9	818.8
1997	224.7	165.0	127.5	37.2	21.6	15.8	7.6	21.2	48.2	46.6	74.3	144.5	934.2
1998	189.2	148.8	150.1	9.2	20.1	19.8	6.0	11.0	32.9	69.9	52.5	76.5	786.0
1999	178.1	184.1	146.4	42.6	21.4	16.3	9.9	8.6	64.2	39.3	87.2	97.5	895.6
2000	199.8	274.8	146.4	12.4	31.6	23.1	51.0	16.5	22.2	76.7	46.4	98.0	998.9
2001	241.0	146.3	139.4	33.6	33.3	18.8	25.6	16.4	23.4	52.5	81.2	101.5	913.0
2002	208.0	183.8	143.7	38.7	28.6	21.8	26.8	20.6	76.2	43.6	62.7	35.9	890.4
2003	141.3	204.9	188.9	37.3	98.6	15.9	6.0	28.6	38.9	38.1	49.6	127.1	975.2
2004	120.9	203.0	131.0	36.7	29.2	20.8	26.9	15.4	30.2	50.2	56.1	198.5	918.7
2005	88.1	105.0	126.6	29.7	21.6	9.8	7.7	12.5	20.4	66.5	51.8	122.6	662.3
2006	173.7	145.2	196.9	33.4	22.3	23.4	5.8	21.3	32.0	66.4	70.0	143.2	933.6
2007	122.7	104.7	196.9	40.1	23.2	9.8	10.8	12.9	27.9	60.4	76.1	140.2	825.6
2008	104.7	148.9	101.6	29.9	24.5	10.0	7.1	1.4	27.1	59.4	41.3	70.5	626.4
2009	154.8	174.8	59.2	55.9	26.7	0.4	6.1	8.7	36.7	50.6	109.0	114.6	797.5
2010	141.4	111.8	131.3	28.5	8.6	0.0	6.6	9.5	20.8	93.2	33.9	132.9	718.5

2011	188.9	204.8	170.4	62.6	17.3	5.6	6.6	5.2	67.7	68.7	91.8	117.1	1006.7
2012	91.6	245.0	112.3	57.8	14.5	12.2	19.2	11.2	37.9	39.5	77.3	48.9	767.4
2013	142.6	155.3	102.5	12.5	24.1	13.2	10.4	44.3	21.8	95.3	100.0	182.0	904.0
2014	181.0	147.2	167.9	42.3	14.8	0.0	35.1	2.1	62.5	71.1	54.3	140.8	919.1
2015	156.3	132.0	104.1	34.3	32.3	7.2	18.1						484.3
2016													
2017	147.2	210.1	110.6	63.2	41.0	0.3	5.5	16.0	55.8	34.9	48.0	131.7	864.3
2018	157.6	113.6	103.4	41.8	34.6	5.7	20.7	41.0	8.3	90.5	84.1	47.3	748.6
2019	161.6	186.0	183.1	49.3	27.4	0.4	4.6	0.0	9.2	40.9	101.1	225.5	989.1
2020	111.8	115.1	31.9										258.8
2021					3.5	7.5	2.2	22.8	9.0	59.0	74.5	105.5	284.0
2022	132.5	120.4	117.6	43.3	9.5	2.9	1.9	16.5	15.6	16.9	12.4	67.5	557.0
<b>PROM</b>	<b>161.8</b>	<b>153.4</b>	<b>136.9</b>	<b>37.2</b>	<b>26.3</b>	<b>11.9</b>	<b>11.6</b>	<b>16.6</b>	<b>35.7</b>	<b>57.8</b>	<b>63.7</b>	<b>111.5</b>	<b>804.7</b>

FUENTE: SENAMHI

<https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>

\*\*\* FUENTE:WWW.SENAMHI.GOB.PE-OFICINA DE ESTADISTICA

\*\*\* FUENTE:WWW.ANA.GOB.PE

\*\*\* FUENTE: ESTUDIO DE HIDROLOGIA-DATO 1990-2000

\*\*\* INFORMACION SIN CONTROL DE CALIDAD

\*\*\* CONFIDENCIAL - AYUM

## ANEXO 4: Datos de estación Pampas



SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA - SENAMHI

### REGISTRO DE PRECIPITACION TOTAL MENSUAL (mm)

ESTACION : PAMPAS DEPARTAMENTO : APURIMAC LATITUD : 73°49'27"  
 TIPO : CONVENCIONAL MET. PROVINCIA : CHINCHEROS LONGITUD : 13°26'05"  
 CODIGO : 113138 DISTRITO : HUACCANA ALTITUD : 2,021 msnm

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1964	56.0	109.0	111.0	52.0	10.0	5.0	4.0	9.0	27.0	24.0	82.0	102.0	591.0
1965	98.0	161.0	220.0	41.0	12.0	4.0	6.0	1.0	55.0	60.0	58.0	142.0	858.0
1966	135.0	147.0	116.0	31.0	58.0	0.0	1.0	31.0	62.0	171.0	132.0	116.0	1,000.0
1967	141.0	192.0	341.0	35.0	20.0	5.0	20.0	26.0	30.0	98.0	77.0	150.0	1,135.0
1968	142.0	148.0	198.0	28.0	12.0	11.0	1.0	9.0	31.0	137.0	87.0	86.0	890.0
1969	172.0	79.0	156.0	59.0	2.0	13.0	2.0	17.0	30.0	67.0	87.0	160.0	844.0
1970	149.0	208.0	138.0	22.0	8.0	3.0	19.0	3.0	88.0	25.0	29.0	173.0	865.0
1971	21.0	217.0	118.0	33.0	9.0	8.0	1.0	6.0	29.0	60.0	74.0	99.0	675.0
1972	199.0	156.0	202.0	47.0	10.0	13.0	21.0	14.0	17.0	28.0	39.0	90.0	836.0
1973	138.0	138.0	128.0	53.0	10.0	12.0	4.0	30.0	32.0	58.0	56.0	81.0	740.0
1974	113.0	229.0	164.0	58.0	1.0	10.0	1.0	23.0	45.0	6.0	20.0	33.0	703.0
1975	54.0	63.0	128.0	5.0	10.0	4.0	3.0	4.0	6.0	7.0	18.0	84.0	386.0
1976	97.0	185.0	55.0	6.0	5.0	12.0	6.0	5.0	56.0	45.0	30.0	51.0	553.0
1977	36.0	57.0	79.0	3.0	4.0	11.0	10.0	4.0	21.0	15.0	100.0	58.0	398.0
1978	39.0	77.0	67.0	34.0	29.0	4.0	1.0	3.0	70.0	24.0	151.0	74.0	573.0
1979	134.0	35.0	98.0	17.0	3.0	5.0	0.0	8.0	24.0	35.0	56.0	62.0	477.0
1980	105.0	84.0	119.0	45.0	3.0	9.0	5.0	1.0	15.0	12.0	19.0	21.0	438.0
1981	22.0	87.0	78.0	24.0	9.0	7.0	2.0	11.0	10.0	47.0	102.0	96.0	495.0
1982	19.0	77.0	88.0	29.0	13.0	2.0	1.0	7.0	24.0	22.0	72.0	98.0	452.0

<b>1983</b>	56.0	105.0	92.0	9.0	2.0	12.0	6.0	1.0	40.0	34.0	46.0	42.0	<b>445.0</b>
<b>1984</b>	15.0	131.0	82.0	6.0	12.0	6.0	0.0	10.0	23.0	45.0	33.0	66.0	<b>429.0</b>
<b>1985</b>	84.0	175.0	104.0	43.0	6.0	4.0	4.0	3.0	37.0	50.0	63.0	111.0	<b>684.0</b>
<b>1986</b>	49.0	106.0	166.0	34.0	3.0	7.0	0.0	8.0	41.0	36.0	58.0	120.0	<b>628.0</b>
<b>1987</b>	87.0	131.0	81.0	52.0	28.0	1.0	7.0	4.0	25.0	31.0	35.0	69.0	<b>551.0</b>
<b>1988</b>	228.0	150.0	78.0	25.0	7.0	1.0	5.0	1.0	87.0	20.0	21.0	92.0	<b>715.0</b>
<b>1989</b>	228.0	185.0	170.0	54.0	13.0	10.0	1.0	13.0	46.0	75.0	54.0	84.0	<b>933.0</b>
<b>1990</b>	63.0	64.0	144.0	17.0	16.0	12.0	3.0	11.0	39.0	28.0	62.0	162.0	<b>621.0</b>
<b>1991</b>	177.0	66.0	97.0	64.0	12.0	7.0	0.0	1.0	24.0	12.0	60.0	80.0	<b>600.0</b>
<b>1992</b>	159.0	132.0	69.0	1.0	5.0	7.0	16.0	28.0	21.0	10.0	17.0	25.0	<b>490.0</b>
<b>1993</b>	183.0	33.0	117.0	57.0	3.0	3.0	10.0	2.0	15.0	15.0	152.0	145.0	<b>735.0</b>
<b>1994</b>	91.0	109.0	67.0	17.0	4.0	9.0	2.0	1.0	23.0	29.0	83.0	133.0	<b>568.0</b>
<b>1995</b>	144.0	111.0	83.0	15.0	23.0	12.0	2.0	10.0	58.0	22.0	40.0	85.0	<b>605.0</b>
<b>1996</b>	105.0	121.0	218.0	64.0	6.0	2.0	1.0	2.0	14.0	39.0	52.0	69.0	<b>693.0</b>
<b>1997</b>	192.0	116.0	118.0	57.0	12.0	0.0	12.0	17.0	34.0	19.0	79.0	205.0	<b>861.0</b>
<b>1998</b>	125.0	83.0	106.0	35.0	3.0	13.0	0.0	8.0	39.0	19.0	21.0	109.0	<b>561.0</b>
<b>1999</b>	112.0	198.0	120.0	52.0	12.0	8.0	1.0	0.0	13.0	19.0	35.0	66.0	<b>636.0</b>
<b>2000</b>	227.0	102.0	110.0	17.0	5.0	13.0	2.0	14.0	42.0	19.0	124.0	130.0	<b>805.0</b>
<b>2001</b>	220.0	281.0	290.0	13.0	15.0	2.0	1.0	22.0	44.0	19.0	124.0	138.0	<b>1,169.0</b>
<b>2002</b>	219.5	117.6	132.9	36.7	9.3	7.6	11.1	7.0	24.3	19.0	70.9	120.3	<b>776.2</b>
<b>2003</b>	159.4	117.7	135.9	38.8	9.6	7.8	4.8	6.7	31.5	19.0	72.1	113.5	<b>716.7</b>
<b>2004</b>	133.4	117.5	132.8	24.3	8.8	7.0	6.0	7.3	30.2	19.0	71.8	125.4	<b>683.6</b>
<b>2005</b>	153.5	120.2	131.5	33.4	9.2	7.8	4.5	6.8	25.3	19.0	70.9	115.9	<b>698.0</b>
<b>2006</b>	152.5	118.9	134.2	34.0	9.3	7.5	5.1	6.7	33.3	19.0	69.3	118.9	<b>708.6</b>
<b>2007</b>	158.7	117.7	118.4	48.0	8.7	7.8	6.9	8.9	30.2	19.0	69.3	134.0	<b>727.7</b>
<b>2008</b>	122.0	75.6	97.2	32.1	9.0	5.0	4.0	0.0	9.0	19.0	65.0	56.0	<b>493.9</b>
<b>2009</b>	120.4	128.0	72.0	95.0	11.0	0.0	8.2	0.0	0.0	19.0	135.2	146.2	<b>735.0</b>
<b>2010</b>	325.4	129.0	173.4	116.0	14.0	0.0	0.0	23.0	28.4	19.0	35.4	62.0	<b>925.6</b>
<b>2011</b>	242.0	125.0	51.2	0.0	44.2	0.0	0.0	8.1	12.1	19.0	87.0	104.2	<b>692.8</b>

<b>2012</b>	124.8	187.4	145.4	51.5	0.0	0.0	0.0	7.0	14.0	19.0	34.0	262.9	<b>846.0</b>
<b>2013</b>	124.8	235.2	104.4	15.8	11.4	0.0	15.4	17.0	12.4	19.0	24.6	123.0	<b>703.0</b>
<b>2014</b>	110.0	118.0	199.4	49.3	14.0	2.0	8.0	8.0	30.0	19.0	95.4	66.0	<b>719.1</b>
<b>2015</b>	181.8	188.5	123.6	49.8	11.0	0.0	9.2	24.4	10.2	19.0	42.6	134.2	<b>794.3</b>
<b>2016</b>	32.6	216.6	95.4	30.6	8.2	4.0	8.8	0.0	26.2	19.0	24.6	161.4	<b>627.4</b>
<b>2017</b>	244.6	225.6	233.4	44.4	75.2	2.0	0.0	3.2	16.4	19.0	79.8	147.2	<b>1,090.8</b>
<b>2018</b>	159.2	285.8	247.8	50.4	6.0	29.4	19.0	18.0	16.0	19.0	158.6	79.4	<b>1,088.6</b>
<b>2019</b>	186.6	183.0	195.4	31.0	12.0	0.0	0.0	0.0	2.0	19.0	103.8	238.6	<b>971.4</b>
<b>2020</b>	58.4	208.2	149.2	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	27.4	19.0	8.0	192.8	<b>668.0</b>
<b>2021</b>	142.2	179.2	245.4	104.6	28.6	0.0	2.0	2.0	22.0	19.0	145.4	128.0	<b>1,018.4</b>
<b>MEDIA</b>	<b>130.5</b>	<b>138.7</b>	<b>135.1</b>	<b>36.9</b>	<b>12.4</b>	<b>6.1</b>	<b>5.1</b>	<b>9.0</b>	<b>30.0</b>	<b>19.0</b>	<b>67.4</b>	<b>109.3</b>	<b>712.5</b>

FUENTE: SENAMHI

<https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>

\*\*\* FUENTE:WWW.SENAMHI.GOB.PE-OFICINA DE ESTADISTICA

\*\*\* FUENTE:WWW.ANA.GOB.PE

\*\*\* FUENTE: ESTUDIO DE HIDROLOGIA-DATO 1990-2000

\*\*\* INFORMACION SIN CONTROL DE CALIDAD

\*\*\* CONFIDENCIAL - AYUM

#### ANEXO 4: Datos de estación Wayllapampa



#### REGISTRO DE PRECIPITACION MENSUAL (mm)

Estación : **WAYLLAPAMPA** Latitud : 13°04'35" S Dpto. : Ayacucho  
 : Precipitación Mensual Acumulada Longitud : 74°12'59" W Prov. : Huamanga  
 Parámetro (mm) Altitud : 2470 m.s.n.m. Distrito : Pacaycasa

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1993	111.0	116.0	93.0	48.2	9.0	6.0	3.2	7.0	62.9	44.3	59.9	106.9	<b>667.4</b>
1994	134.2	84.1	113.7	21.0	4.2	0.2	1.2	0.2	12.0	10.8	33.4	82.6	<b>497.6</b>
1995	135.8	126.5	61.2	8.6	18.3	2.4	3.4	2.7	8.6	20.6	44.6	27.6	<b>460.3</b>
1996	70.2	106.3	116.3	40.3	2.0	0.0	0.0	14.1	14.2	16.6	34.7	55.8	<b>470.5</b>
1997	148.7	88.1	57.5	21.0	1.2	0.0	2.3	16.6	38.6	0.6	69.4	86.0	<b>530.0</b>
1998	129.6	92.4	76.6	14.7	0.0	1.2	0.0	1.2	2.2	25.5	5.7	61.5	<b>410.6</b>
1999	102.6	109.9	67.1	21.0	0.0	0.0	1.8	0.0	42.0	11.1	82.0	52.7	<b>490.2</b>
2000	96.0	188.0	176.0	13.1	21.6	14.6	25.9	6.2	5.9	27.8	9.8	103.2	<b>688.1</b>
2001	279.5	161.8	115.4	21.2	33.9	3.2	39.0	17.7	20.2	47.4	65.7	34.5	<b>839.5</b>
2002	88.4	122.7	191.6	31.3	16.8	2.2	33.3	20.8	28.8	20.9	42.6	90.9	<b>690.3</b>
2003	37.7	177.1	121.7	80.4	5.5	1.0	0.0	16.0	17.2	0.0	13.0	62.9	<b>532.5</b>
2004	112.4	80.9	66.4	8.5	8.0	5.4	19.7	8.7	23.8	39.0	43.8	133.8	<b>550.4</b>
2005	60.9	60.0	44.0	17.6	26.1	0.0	2.5	4.9	4.0	47.4	26.1	89.4	<b>382.9</b>
2006	111.2	82.9	120.2	35.0	6.5	3.5	2.3	13.1	18.3	38.2	88.4	71.1	<b>590.7</b>
2007	61.8	73.7	121.6	39.2	25.7	9.6	4.7	6.9	14.6	45.7	60.6	73.6	<b>537.7</b>
2008	106.7	80.1	47.8	16.2	24.2	2.8	0.3	3.6	11.0	14.4	26.8	71.6	<b>405.5</b>
2009	104.2	141.7	39.8	49.3	15.7	0.4	3.9	8.2	15.3	41.6	76.7	134.7	<b>631.5</b>
2010	126.1	105.9	60.5	19.1	8.5	0.0	2.2	10.7	14.7	46.4	29.1	97.3	<b>520.5</b>
2011	143.4	187.3	106.1	38.0	16.4	0.1	10.2	0.7	43.9	37.4	78.5	109.6	<b>771.6</b>

<b>2012</b>	90.8	261.0	86.6	75.8	38.3	7.6	10.1	1.3	34.0	28.4	78.8	152.4	<b>865.1</b>
<b>2013</b>	105.5	112.7	114.5	10.6	10.3	3.1	6.1	34.9	31.1	77.6	66.5	132.5	<b>705.4</b>
<b>2014</b>	150.5	89.1	135.6	25.6	12.9	0.0	3.6	4.0	42.5	67.8	28.6	104.4	<b>664.6</b>
<b>2015</b>	161.7	131.5	121.8	25.2	40.5	5.9	14.4						<b>501.0</b>
<b>2016</b>													
<b>2017</b>	109.7	158.6	87.7	51.0	28.4	<b>57.8</b>	8.1	9.8	30.4	31.9	48.3	71.9	<b>693.6</b>
<b>2018</b>	105.8	120.2	82.9	19.8	7.4	4.4	21.1	40.6	18.9	73.2	90.6	43.2	<b>628.1</b>
<b>2019</b>	115.1	147.7	116.4	33.3	6.8	0.6	7.2	0.0	4.4	16.3	103.6	157.3	<b>708.7</b>
<b>2020</b>	71.0	100.5	21.9						17.6	8.8	6.0	65.8	<b>291.6</b>
<b>PROM</b>	<b>113.0</b>	<b>124.3</b>	<b>94.3</b>	<b>29.8</b>	<b>15.6</b>	<b>5.2</b>	<b>9.3</b>	<b>10.6</b>	<b>20.9</b>	<b>32.7</b>	<b>50.8</b>	<b>86.8</b>	<b>582.4</b>

FUENTE: SENAMHI

<https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>

\*\*\* FUENTE: WWW.SENAMHI.GOB.PE-OFICINA DE ESTADISTICA

\*\*\* FUENTE: WWW.ANA.GOB.PE

\*\*\* FUENTE: ESTUDIO DE HIDROLOGIA-DATO 1990-2000

\*\*\* INFORMACION SIN CONTROL DE CALIDAD

\*\*\* CONFIDENCIAL - AYUM



1983													
1984													
1985													
1986													
1987													
1988													
1989													
1990	88.1	4.8	40.3	27.2	15.7	34.4	3.1	16.2	36.3	48.9	23.4	57.6	396
1991	68.8	23.6	3.5	6.3	14.4	11.1	0.0	0.0	0.0	38.4	26.7	4.4	197.2
1992	41.9	32.1	114.8	56.2	1.5	0.6	0.1	3.0	25.3	65.7	60.7	94.4	496.3
1993	129.9	111.4	99.9	40.9	4.6	3.9	1.9	9.4	39.2	38.8	52.7	5.0	537.6
1994	86.9	98.0	97.6	47.5	13.2	5.3	0.7	1.9	13.9	18.2	37.2	65.0	485.4
1995	75.0	91.0	105.5	35.3	6.7	3.0	5.2	3.2	11.0	26.4	61.5	66.5	490.3
1996	87.5	115.5	106.6	48.6	7.1	1.3	2.0	10.7	11.6	26.4	24.7	85.5	527.5
1997	95.2	104.2	60.1	36.1	9.5	0.2	2.1	23.8	24.4	21.0	58.6	117.3	552.5
1998	94.6	89.5	84.5	29.8	2.7	17.5	0.7	5.0	5.9	38.1	33.9	75.1	477.3
1999	103.5	93.0	96.3	28.4	11.1	3.8	9.1	9.0	12.0	31.3	43.2	70.9	511.6
2000	112.9	148.2	97.3	28.2	31.9	4.2	18.8	9.9	5.3	54.7	18.1	79.1	608.6
2001	150.9	81.0	109.9	14.3	37.3	2.4	34.9	19.4	3.5	48.9	63.6	83.5	649.6
2002	44.2	118.4	111.7	41.7	20.7	1.6	23.0	8.7	22.3	20.0	71.4	75.4	559.1
2003	62.9	131.5	143.0	88.8	12.6	1.5	0.0	16.3	22.9	13.5	14.3	104.2	611.5
2004	58.5	92.5	54.1	4.0	8.2	7.9	18.1	11.1	22.0	19.9	34.6	97.7	428.6
2005	42.5	98.2	119.8	14.7	8.2	0.0	5.0	0.0	3.6	30.6	34.7	82.1	439.4
2006	91.4	69.2	68.9	29.5	0.0	7.8	0.0	4.5	11.4	34.5	53.3	67.3	437.8
2007	98.7	43.4	111.6	21.7	4.3	0.0	4.3	3.0	6.0	41.0	44.8	24.4	403.2
2008	73.7	90.7	23.7	3.6	12.0	5.7	0.0	0.0	4.7	18.0	23.0	35.8	290.9
2009	86.0	115.1	67.1	47.2	28.8	1.0	8.9	3.0	12.5	13.4	26.1	45.1	454.2
2010	161.6	61.1	92.3	22.1	0.0	0.0	0.0	4.0	7.0	41.2	29.4	137.9	556.6
2011	208.8	93.1	78.3	29.5	7.6	0.2	1.3	0.2	13.9	35.6	54.4	92.8	615.7

2012	89.9	141.1	36.9	50.3	8.3	5.7	6.3	6.2	21.5	21.6	37.3	130.9	556.0
2013	132.1	98.0	76.9	34.7	0.8	3.1	1.3	39.2	2.4	57.2	71.4	124.2	641.3
2014	130.9	86.6	51.0	12.6	14.2	0.0	3.3	0.0	12.7	48.2	29.9	91.1	480.5
2015	169.7	84.4	66.6	69.6	17.4	9.0	11.0	44.2	2.9	23.3	45.7	94.9	638.7
2016	18.9	18.9	18.9	31.3	2.1	0.0	11.7	0.0	18.3	31.3	31.7	44.1	227.3
2017	131.1	136.0	81.1					6.9	11.7	38.8	81.4	51.2	538.2
2018	109.5	81.5	46.1	26.3	15.2	2.6	16.7	23.5	3.3	59.6	48.1	54.3	486.7
2019	103.5	97.7	79.7	30.6	12.2	2.8	7.9	9.1	10.9	20.4	56.3	152.2	583.2
2020	49.7	81.1	20.7	30.6	12.2	0.0	1.5	1.0	2.5	20.0	5.8	137.2	362.4
2021	57.5	86.0	89.9	32.0	6.0	3.0	0.0	1.0	12.0	11.0	38.0	32.0	368.4
<b>MEDIA</b>	<b>99.3</b>	<b>93.3</b>	<b>74.8</b>	<b>31.6</b>	<b>12.4</b>	<b>2.8</b>	<b>8.3</b>	<b>9.6</b>	<b>10.6</b>	<b>31.9</b>	<b>41.5</b>	<b>83.5</b>	<b>497.2</b>

FUENTE: SENAMHI

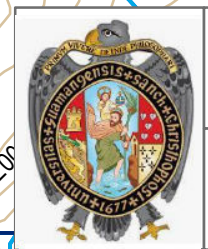
## **ANEXO 4: Planos**

# MAPA DE CUENCA Y RED HIDRICA DEL RIO UCUSMAYO

ESCALA: 1/40,000

## LEYENDA

-  Area de la cuenca
-  Laguna Saracocha
-  RIOS
-  Qebradas
-  Curvas de nivel
-  Centros poblados



**UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**E.P. INGENIERÍA AGRÍCOLA**  
**TESIS:** "Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel – La Mar, 2024."



**UBICACIÓN:**  
Lugar: San Miguel  
Distrito: San Miguel  
Provincia: La Mar  
Departamento: Ayacucho

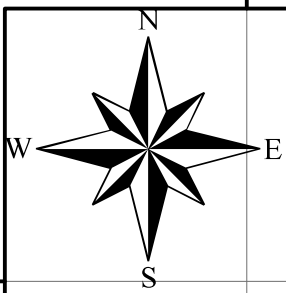
**PLANO:** Cuenca y red hídrico del río Ucumayo  
**TESISTA:** Ruth Lujan Gutierrez  
**FECHA:** abril - 2024

**LAMINA:**  
**C-01**

**ESCALA:** indicado

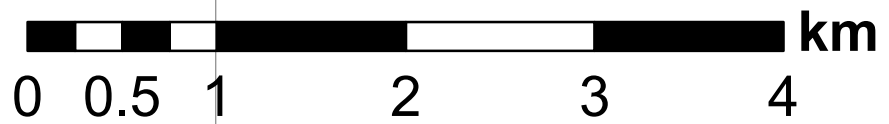
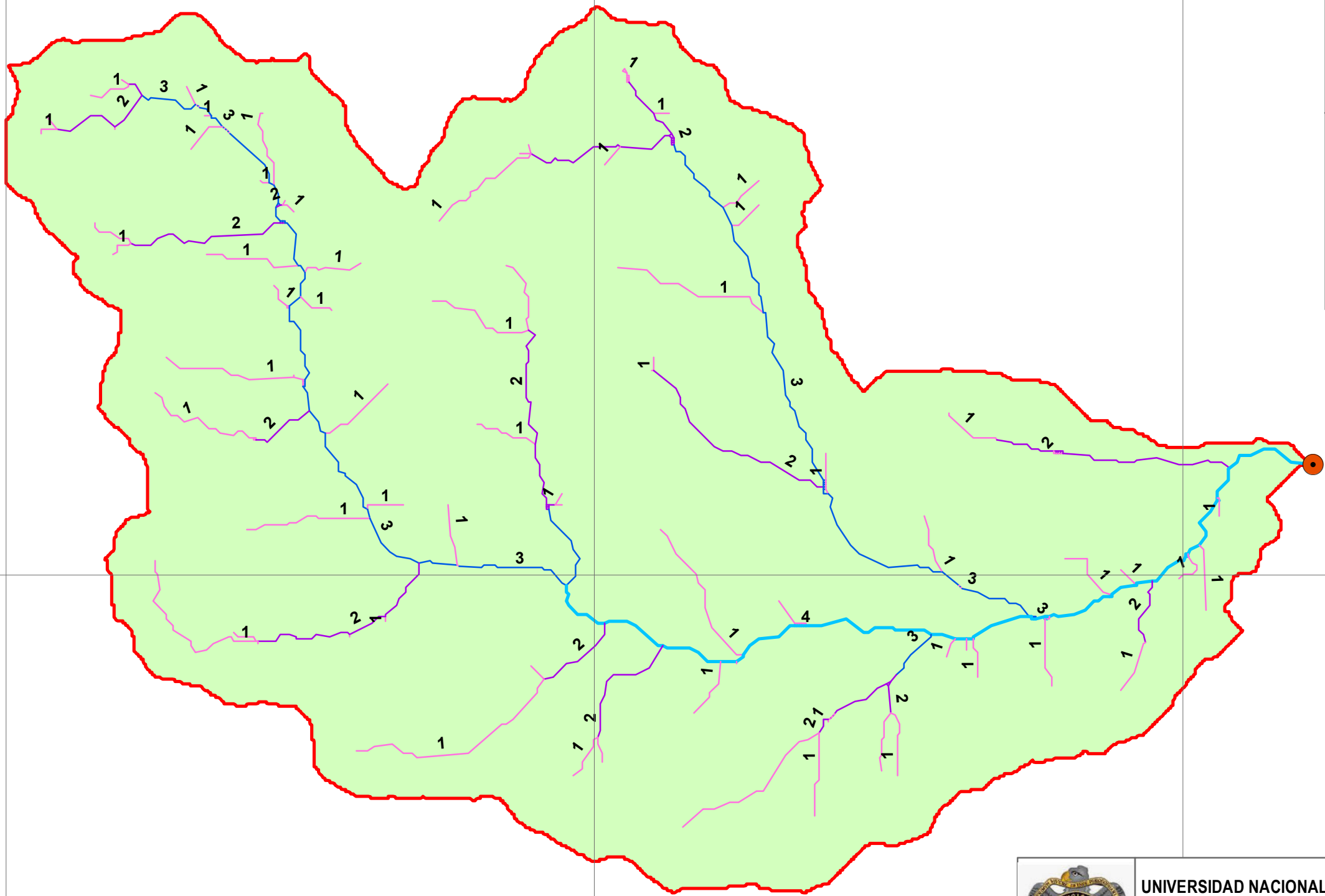
# CLASIFICACIÓN DEL ORDEN DE RIO

(Método Strahler)



## LEYENDA

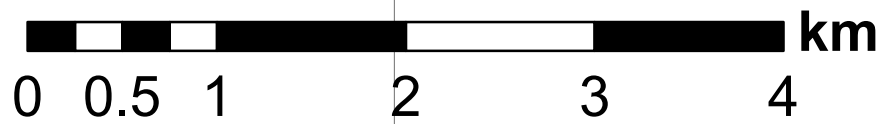
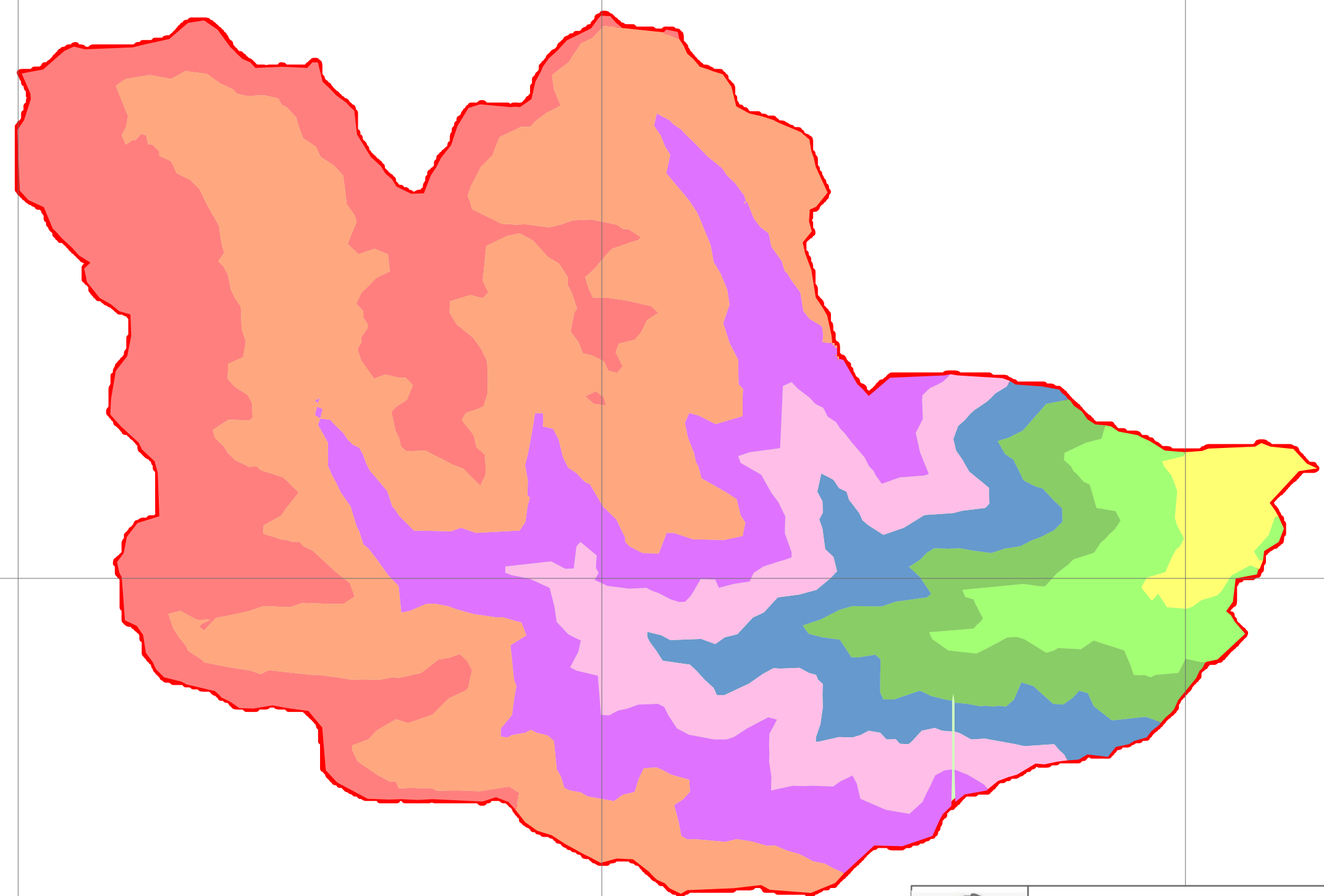
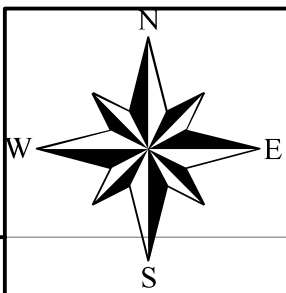
- desfogue\_Ucusmayo
- Orden de rio
  - 1
  - 2
  - 3
  - 4
- CUENCA\_OK



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA</b> E.P. INGENIERÍA AGRÍCOLA		
	TESIS: "Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel – La Mar, 2024."		
<b>UBICACIÓN:</b> Lugar: San Miguel Distrito: San Miguel Provincia: La Mar Departamento: Ayacucho		<b>PLANO:</b> Clasificación del orden de río	<b>LAMINA:</b> C-02
		<b>TESISTA:</b> Ruth Lujan Gutierrez	
		<b>FECHA:</b> abril - 2024	<b>ESCALA:</b> 1/40,000

# MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DE LA CUENCA (DEM)

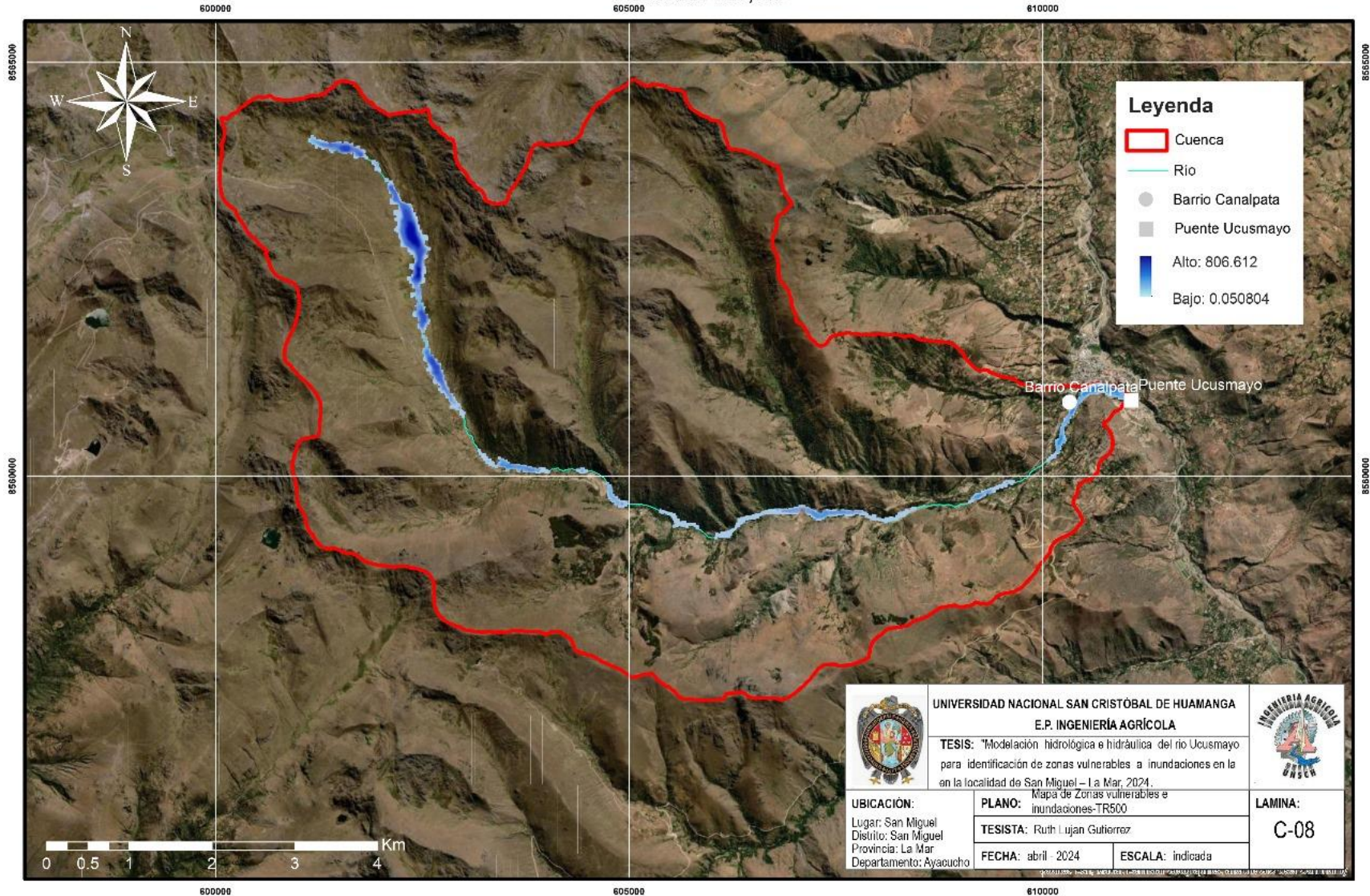
ESCALA: 1/40,000



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA</b> <b>E.P. INGENIERÍA AGRÍCOLA</b>		
	TESIS: "Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel – La Mar, 2024."		
<b>UBICACIÓN:</b> Lugar: San Miguel Distrito: San Miguel Provincia: La Mar Departamento: Ayacucho	<b>PLANO:</b> Modelo digital de elevación de la cuenca (DEM)		<b>LAMINA:</b> <b>C-03</b>
	<b>TESISTA:</b> Ruth Lujan Gutierrez		
	<b>FECHA:</b> abril - 2024	<b>ESCALA:</b> indicada	

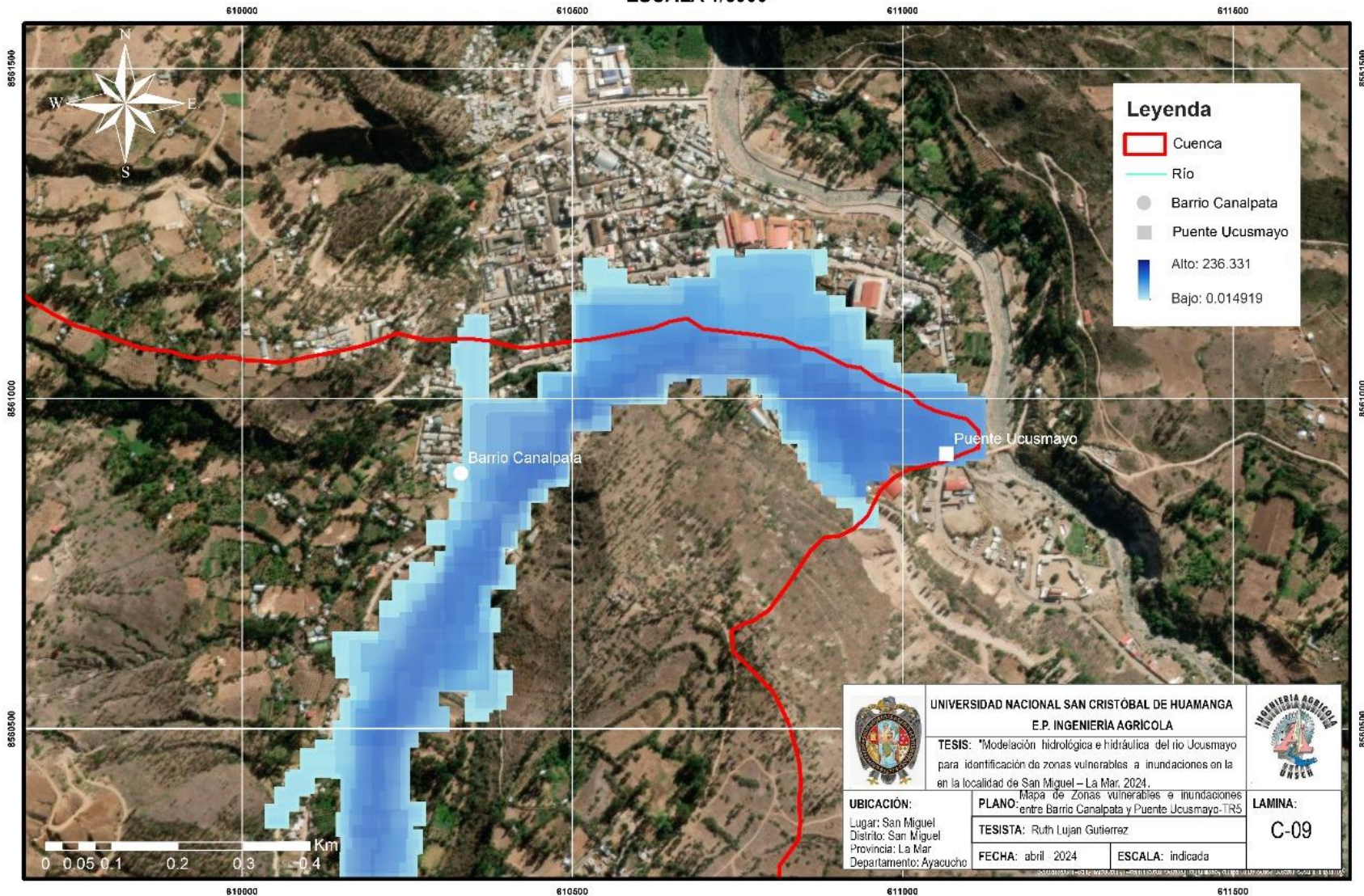
# ZONAS VULNEAREABLES E INUNDACIONES-TR500

ESCALA 1/40,000



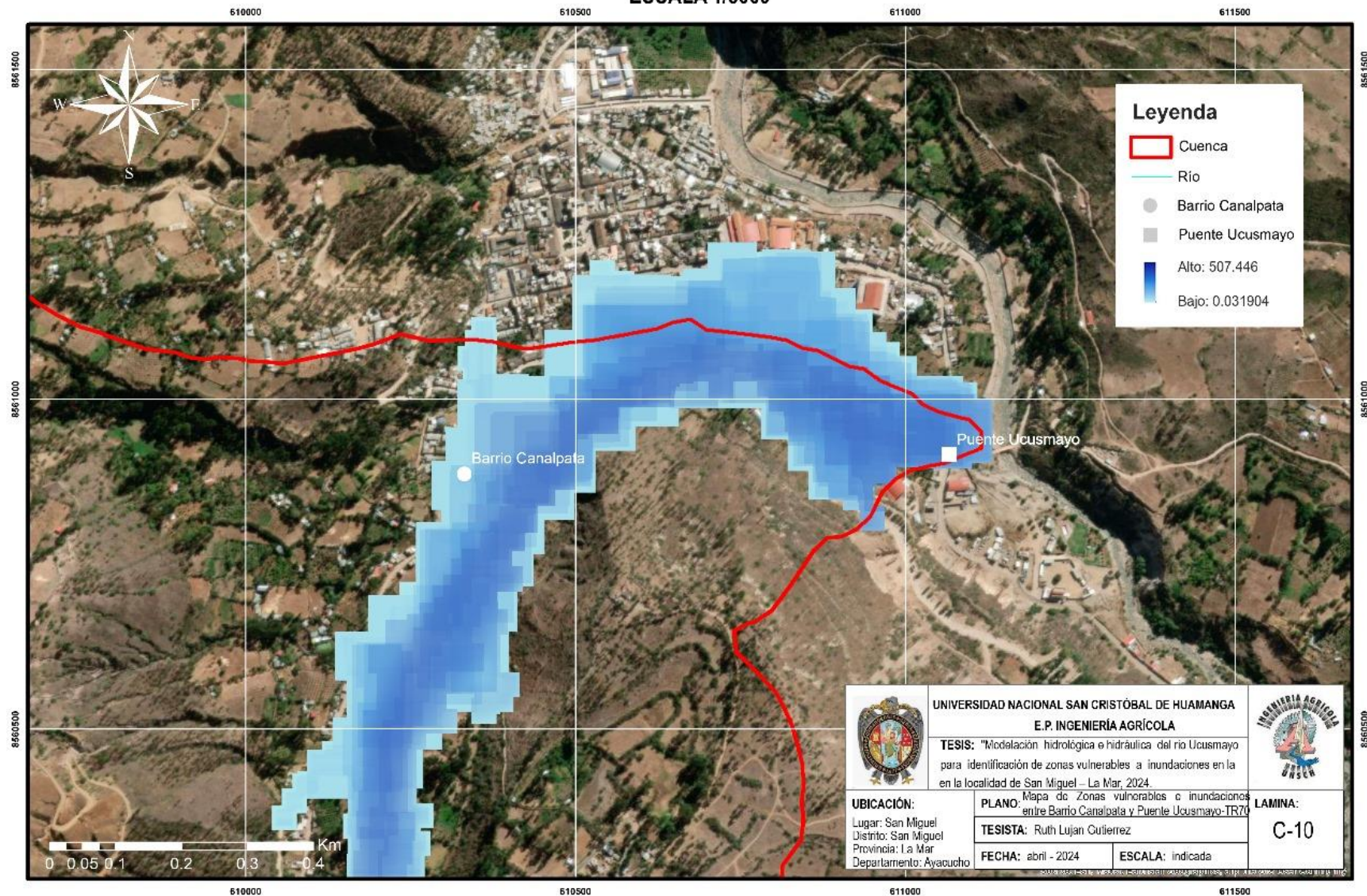
# ZONAS VULNEAREABLES E INUNDACIONES ENTRE BARRIO CANALPATA Y PUENTE UCUSMAYO-TR5

ESCALA 1/5000



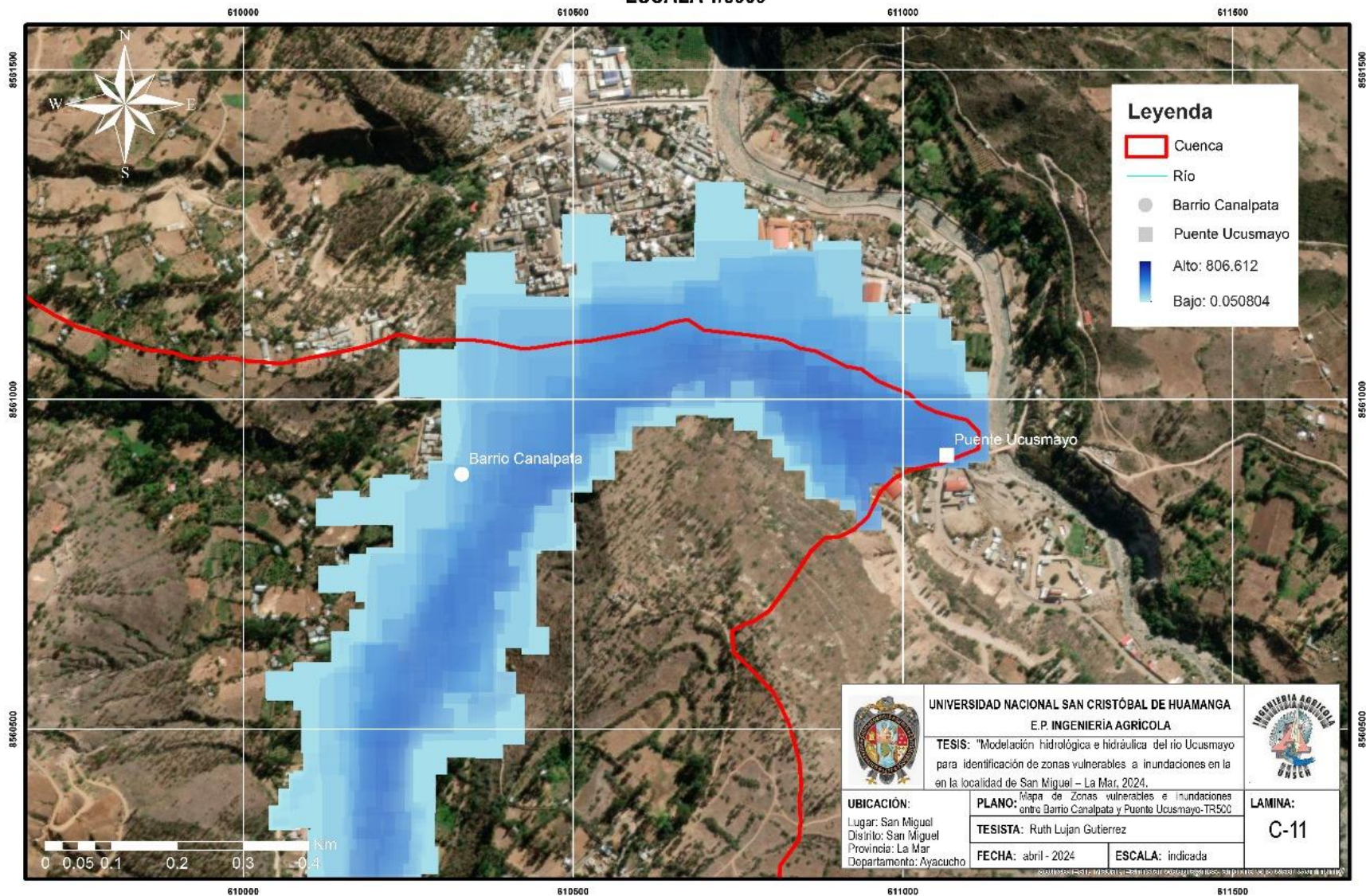
# ZONAS VULNEAREABLES E INUNDACIONES ENTRE BARRIO CANALPATA Y PUENTE UCUSMAYO-TR70

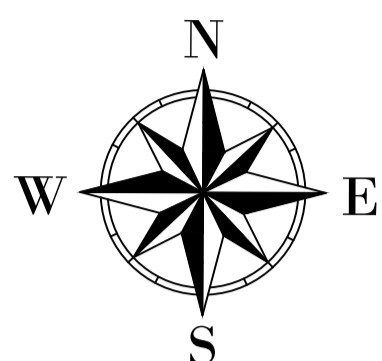
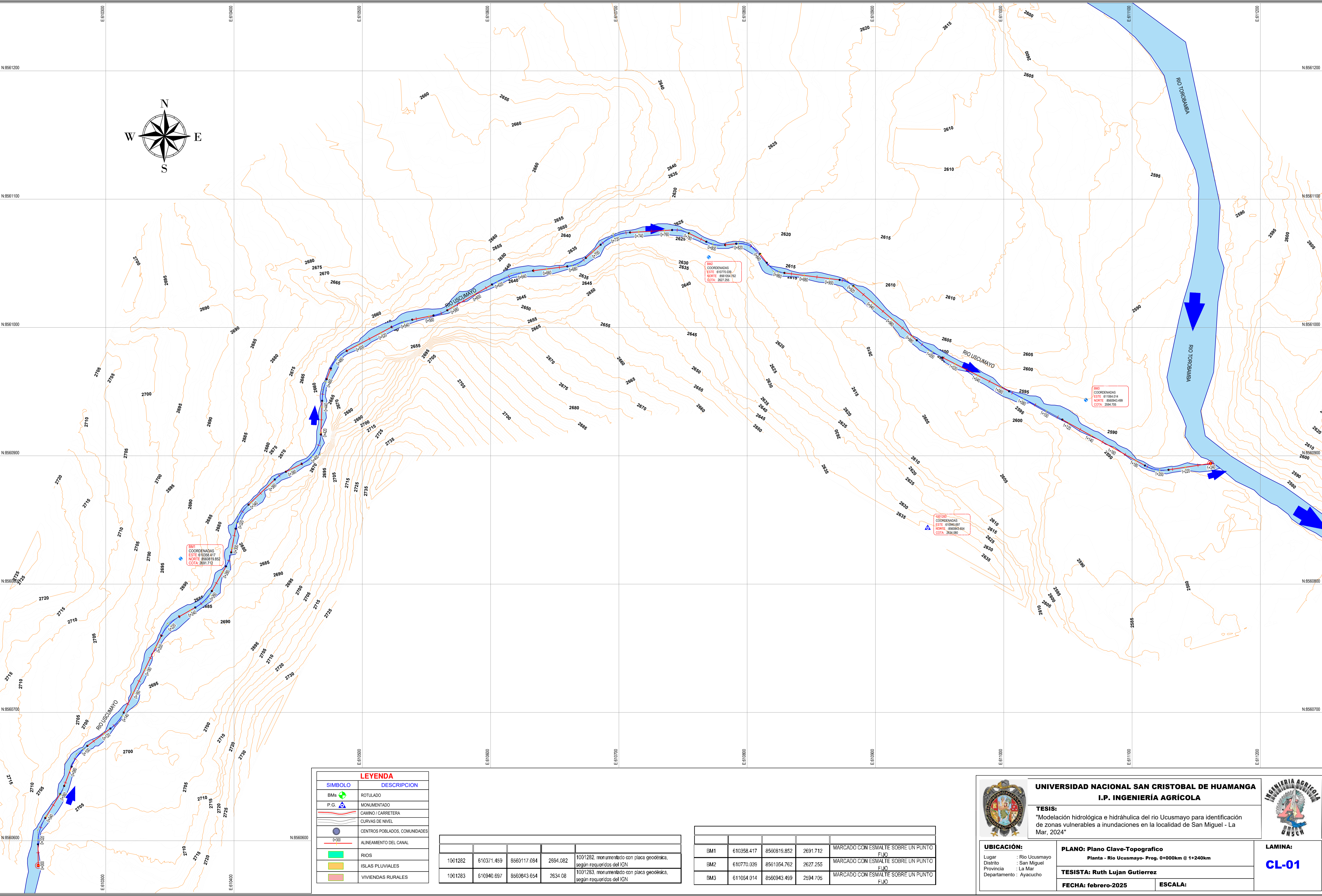
ESCALA 1/5000



# ZONAS VULNEAREABLES E INUNDACIONES ENTRE BARRIO CANALPATA Y PUENTE UCUSMAYO-TR500

ESCALA 1/5000





**B.M1**  
 COORDENADAS  
 ESTE: 610371.459  
 NORTE: 8560117.084  
 COTA: 2694.082

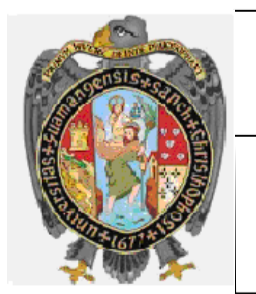
**B.M2**  
 COORDENADAS  
 ESTE: 610770.039  
 NORTE: 8561054.762  
 COTA: 2627.255

**B.M3**  
 COORDENADAS  
 ESTE: 611064.014  
 NORTE: 8560943.499  
 COTA: 2694.705

LEYENDA	
SIMBOLO	DESCRIPCION
	ROTULADO
	MONUMENTADO
	CAMINO / CARRETERA
	CURVAS DE NIVEL
	CENTROS POBLADOS, COMUNIDADES
	ALINEAMIENTO DEL CANAL
	RIOS
	ISLAS PLUVIALES
	VIVIENDAS RURALES

ID	ESTE	NORTE	COTA	DESCRIPCION
1001282	610371.459	8560117.084	2694.082	1001282. monumentado con placa geodésica, según requeridos del IGN
1001283	610940.697	8560943.654	2634.08	1001283. monumentado con placa geodésica, según requeridos del IGN

ID	ESTE	NORTE	COTA	DESCRIPCION
BM1	610358.417	8560819.852	2691.712	MARCADO CON ESMALTE SOBRE UN PUNTO FIJO
BM2	610770.039	8561054.762	2627.255	MARCADO CON ESMALTE SOBRE UN PUNTO FIJO
BM3	611064.014	8560943.499	2694.705	MARCADO CON ESMALTE SOBRE UN PUNTO FIJO



**UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA**  
**I.P. INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**TESIS:**  
 "Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel - La Mar, 2024"

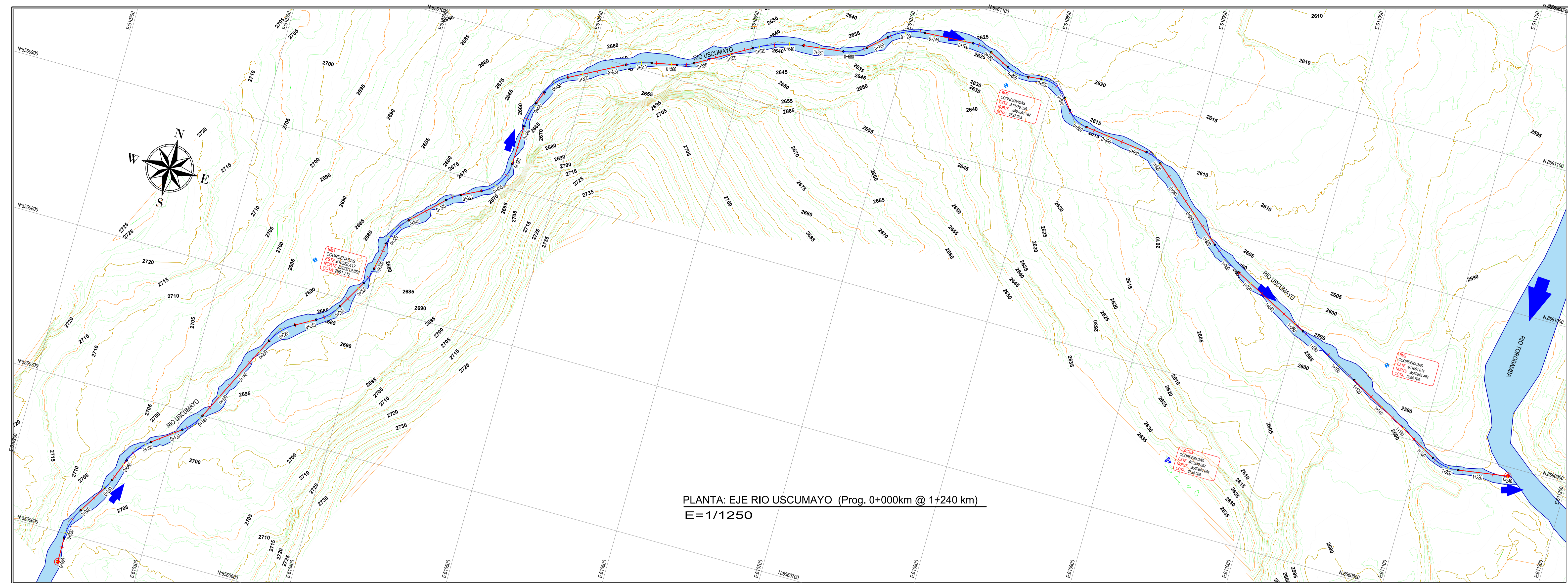
**UBICACIÓN:**  
 Lugar : Río Ucumayo  
 Distrito : San Miguel  
 Provincia : La Mar  
 Departamento : Ayacucho

**PLANO:** Plano Clave-Topografico  
 Planta - Río Ucumayo- Prog. 0+000km @ 1+240km

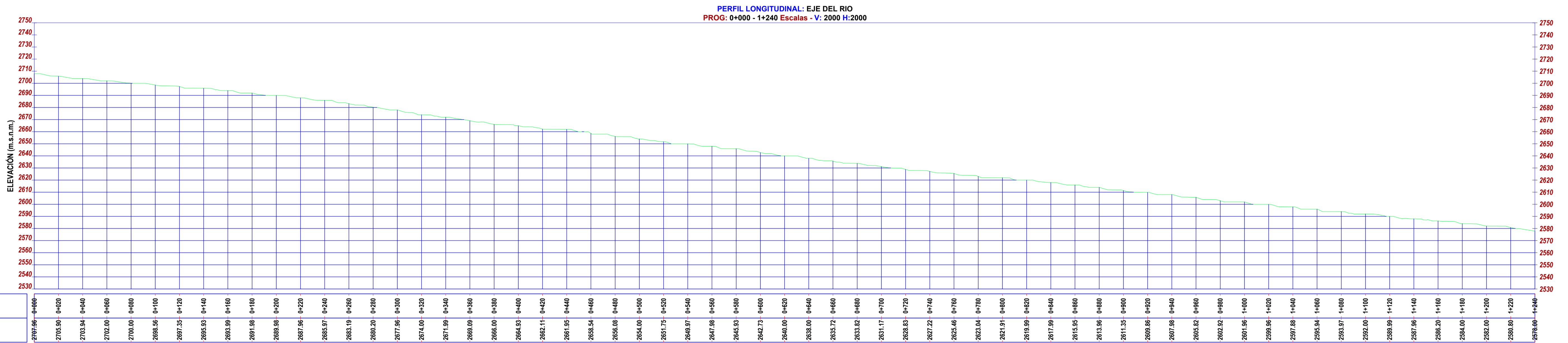
**TESISTA:** Ruth Lujan Gutierrez  
**FECHA:** febrero-2025  
**ESCALA:**



**LAMINA:**  
**CL-01**



PLANTA: EJE RIO USCUMAYO (Prog. 0+000km @ 1+240 km)  
E=1/1250




PERFIL LONGITUDINAL: EJE DEL RIO  
PROG: 0+000 - 1+240 Escalas - V: 2000 H: 2000

PROGRESIVA (Km)	0+000	0+020	0+040	0+060	0+080	0+100	0+120	0+140	0+160	0+180	0+200	0+220	0+240	0+260	0+280	0+300	0+320	0+340	0+360	0+380	0+400	0+420	0+440	0+460	0+480	0+500	0+520	0+540	0+560	0+580	0+600	0+620	0+640	0+660	0+680	0+700	0+720	0+740	0+760	0+780	0+800	0+820	0+840	0+860	0+880	0+900	0+920	0+940	0+960	0+980	1+000	1+020	1+040	1+060	1+080	1+100	1+120	1+140	1+160	1+180	1+200	1+220	1+240
COTA TERRENO (m.s.n.m.)	2697.96	2705.90	2703.94	2702.00	2700.00	2698.56	2697.35	2695.83	2693.99	2691.98	2689.98	2687.96	2685.97	2683.19	2680.20	2677.96	2674.00	2671.99	2669.09	2666.00	2664.93	2662.11	2661.95	2658.54	2656.08	2654.00	2651.75	2649.97	2647.98	2645.83	2642.73	2640.00	2638.00	2635.72	2633.82	2631.17	2628.83	2627.22	2625.46	2623.04	2621.91	2619.99	2617.99	2615.95	2613.96	2611.35	2609.86	2607.98	2605.82	2603.92	2601.96	2599.96	2597.88	2595.94	2593.97	2592.00	2589.99	2587.96	2586.20	2584.00	2582.00	2580.80	2579.60

LEYENDA	
SIMBOLO	DESCRIPCION
B.M.	ROTULADO
P.G.	MONUMENTADO
(Linea roja)	CAMINO / CARRETERA
(Linea azul)	CURVAS DE NIVEL
(Circulo azul)	CENTROS POBLADOS, COMUNIDADES
(Linea roja)	ALINEAMIENTO DEL CANAL
(Linea verde)	RIOS
(Linea amarilla)	ISLAS PLUVIALES
(Linea roja)	VIVIENDAS RURALES

PROG	E	N	C	DESCRIPCION
1001282	610371.459	8560117.084	2694.082	1001282. monumentado con placa geodesica, según requeridos del IGN
1001283	610940.697	8560943.654	2634.08	1001283. monumentado con placa geodesica, según requeridos del IGN

PROG	E	N	C	DESCRIPCION
BM1	610358.417	8560819.852	2691.712	MARCADO CON ESMALTE SOBRE UN PUNTO FIJO
BM2	610770.039	8561054.762	2627.255	MARCADO CON ESMALTE SOBRE UN PUNTO FIJO
BM3	611064.014	8560943.459	2694.705	MARCADO CON ESMALTE SOBRE UN PUNTO FIJO



**UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA**  
**I.P. INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**TESIS:**  
"Modelación hidrológica e hidráulica del río Uscumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel - La Mar, 2024"



**INGENIERÍA AGRÍCOLA**  
**UNSCH**

**UBICACIÓN:**

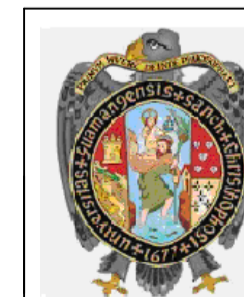
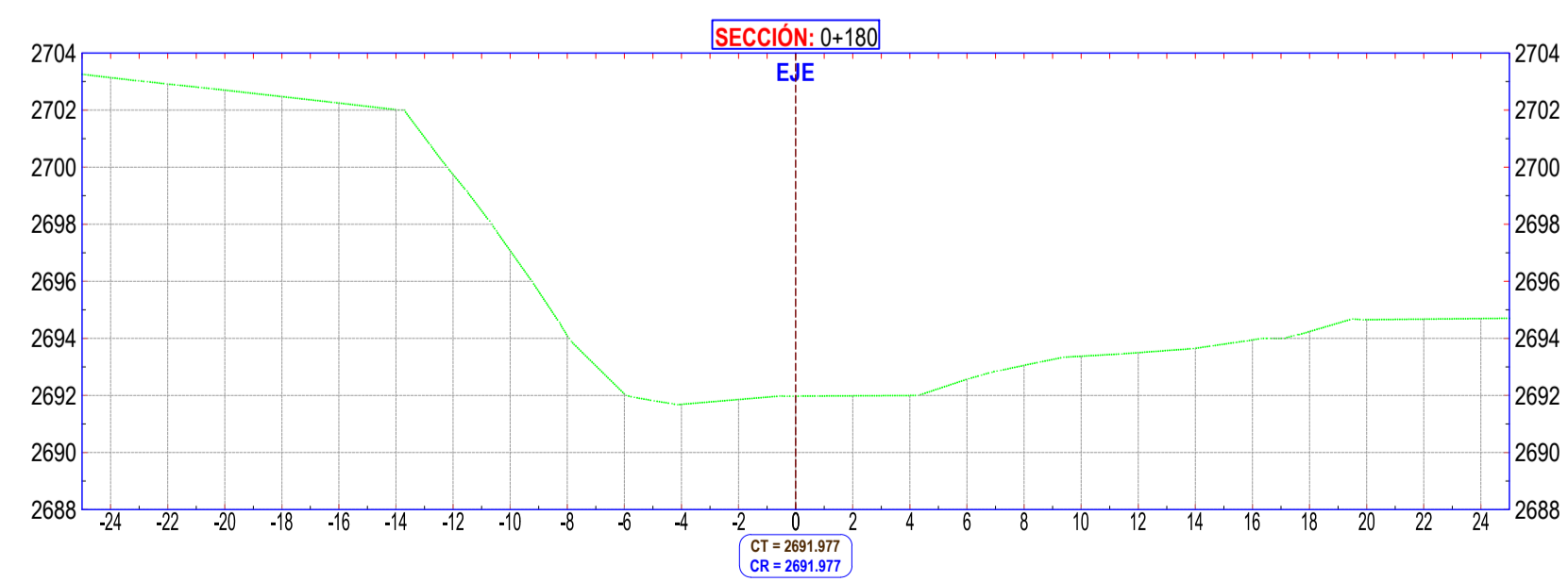
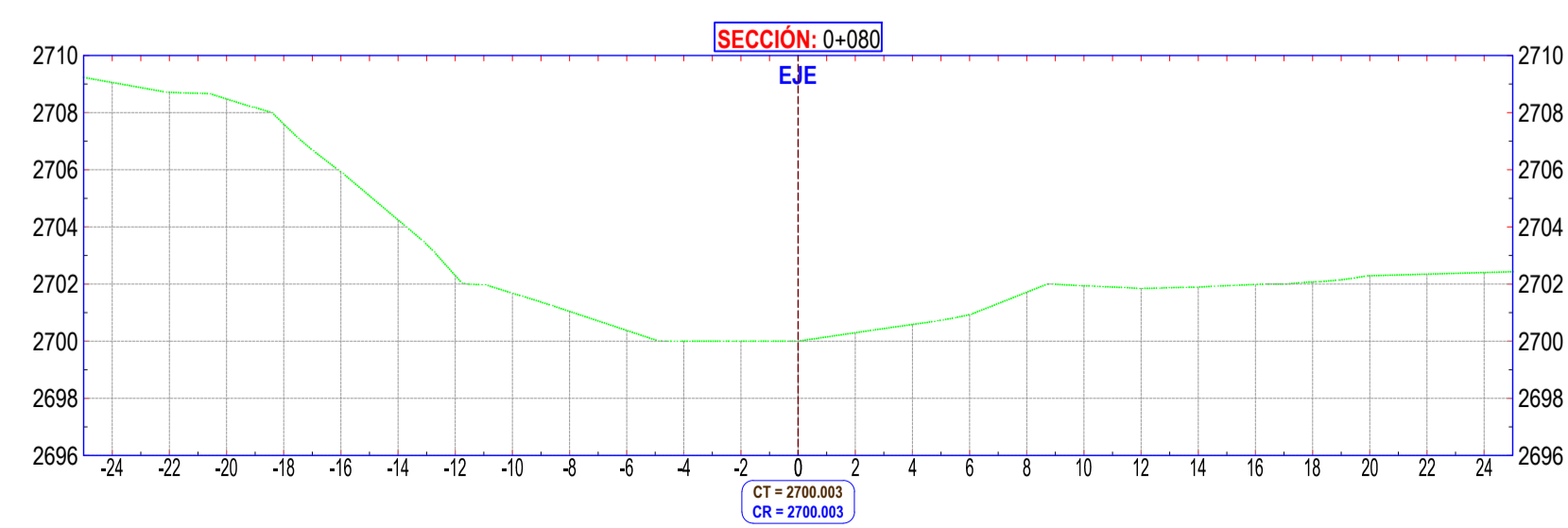
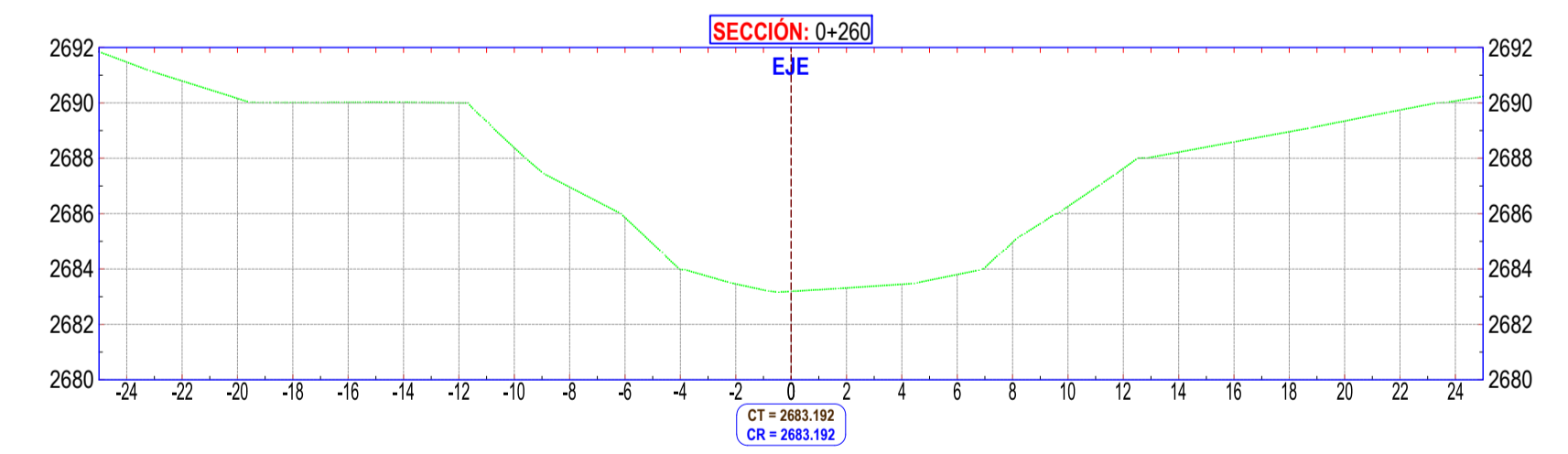
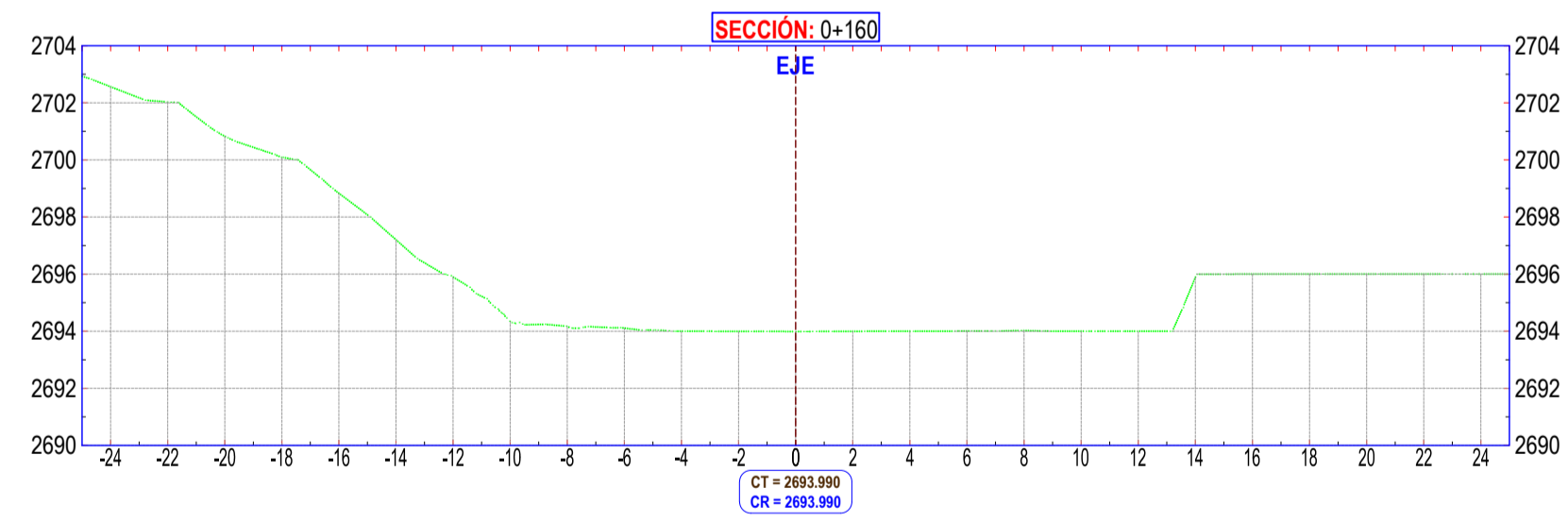
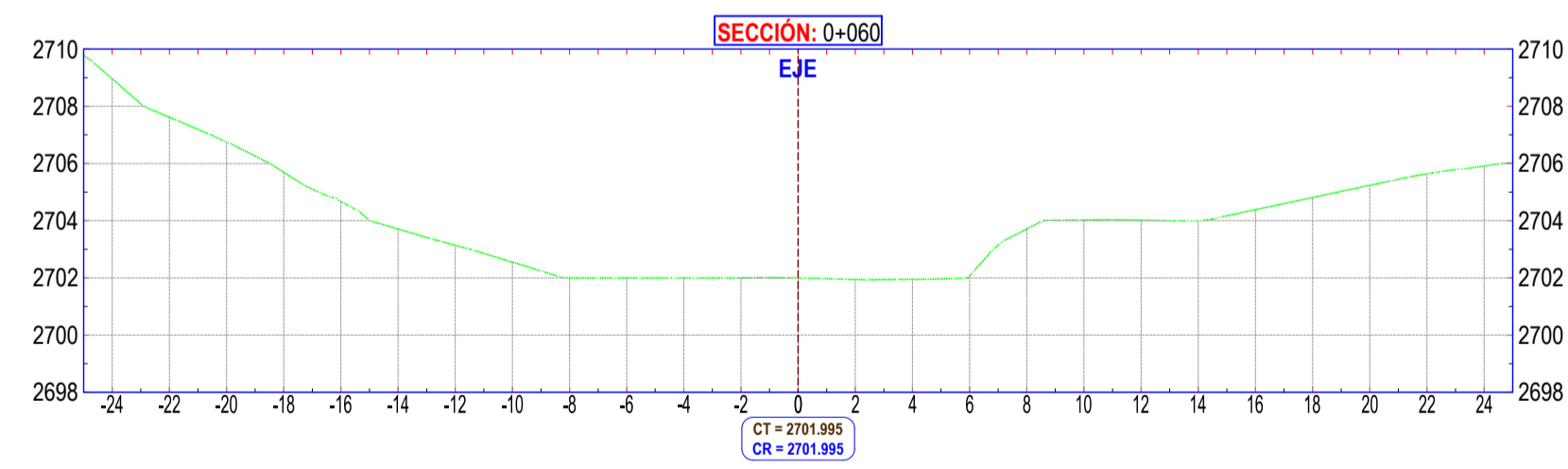
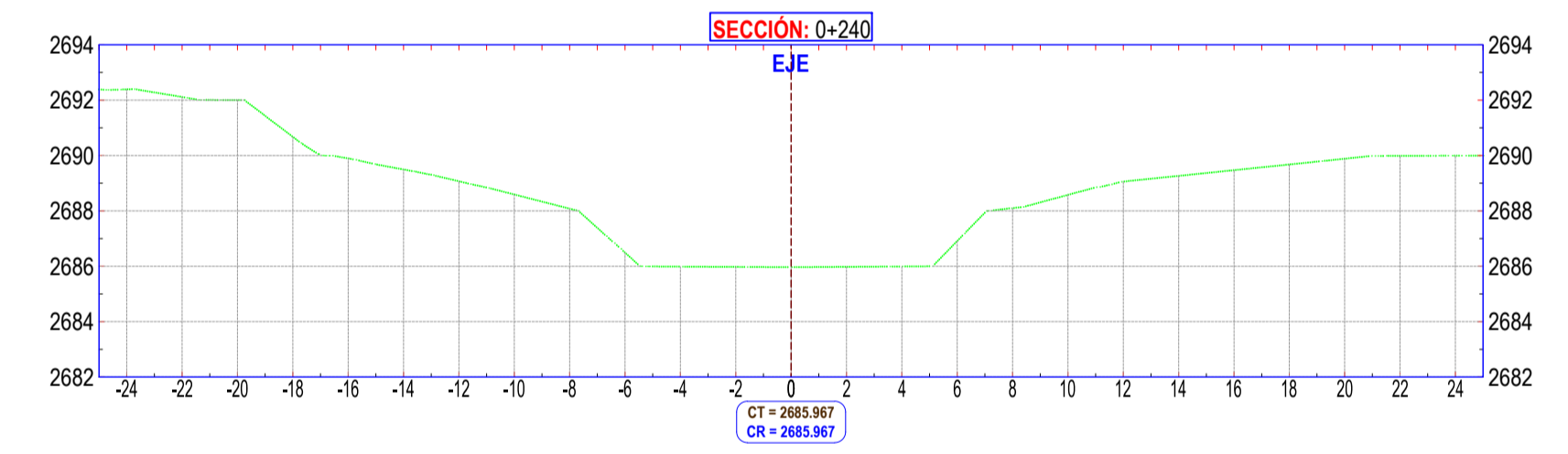
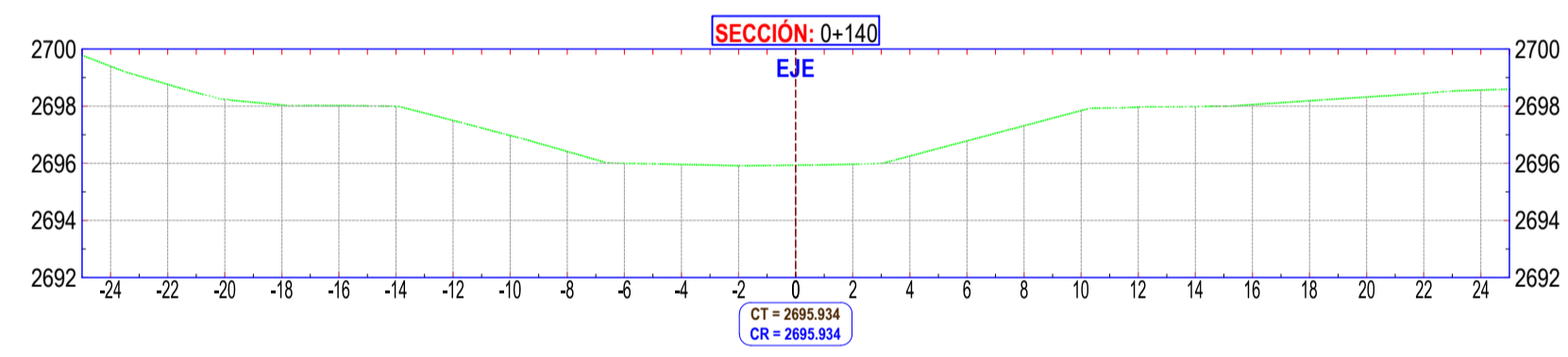
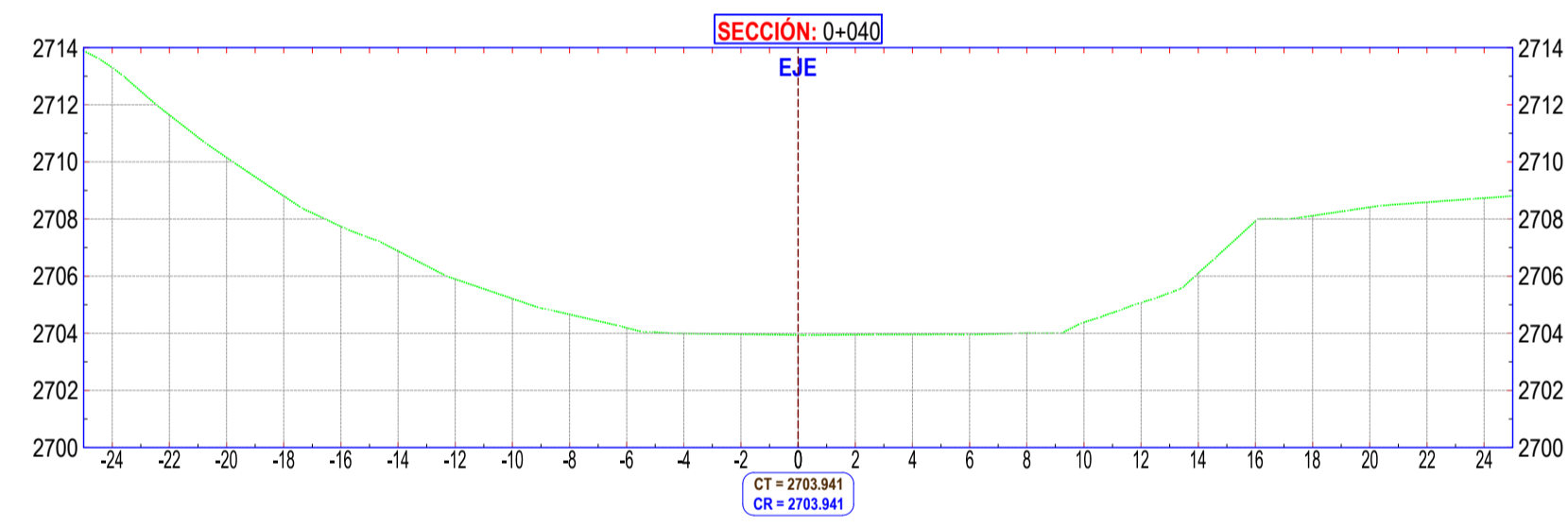
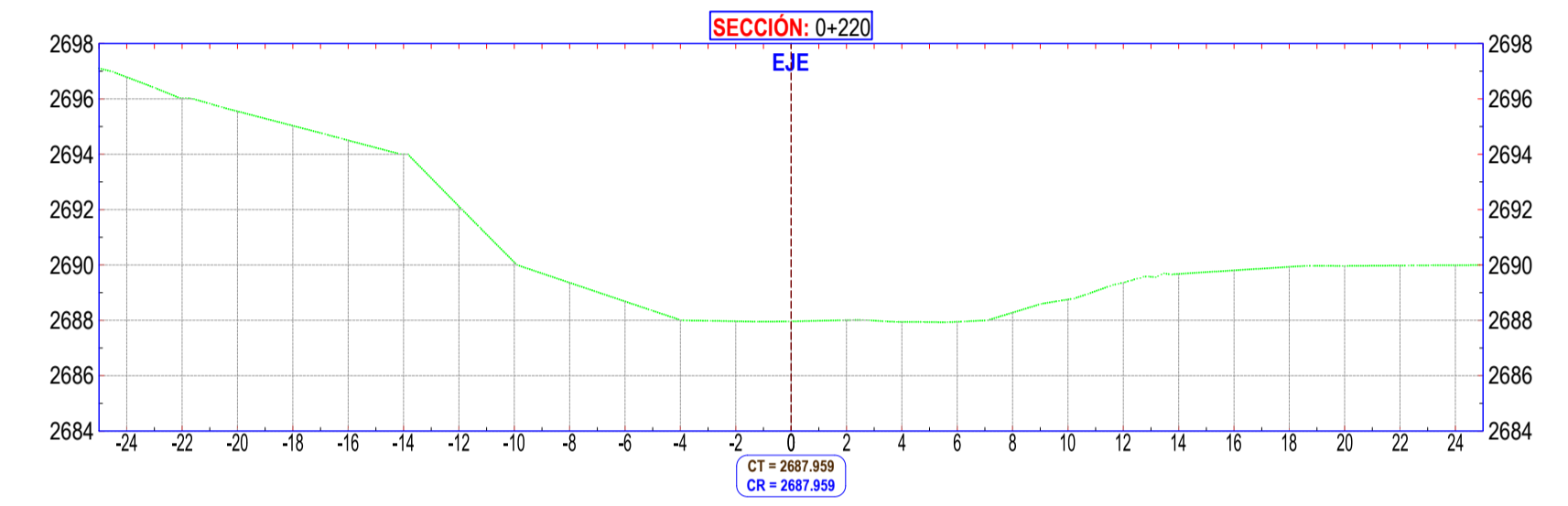
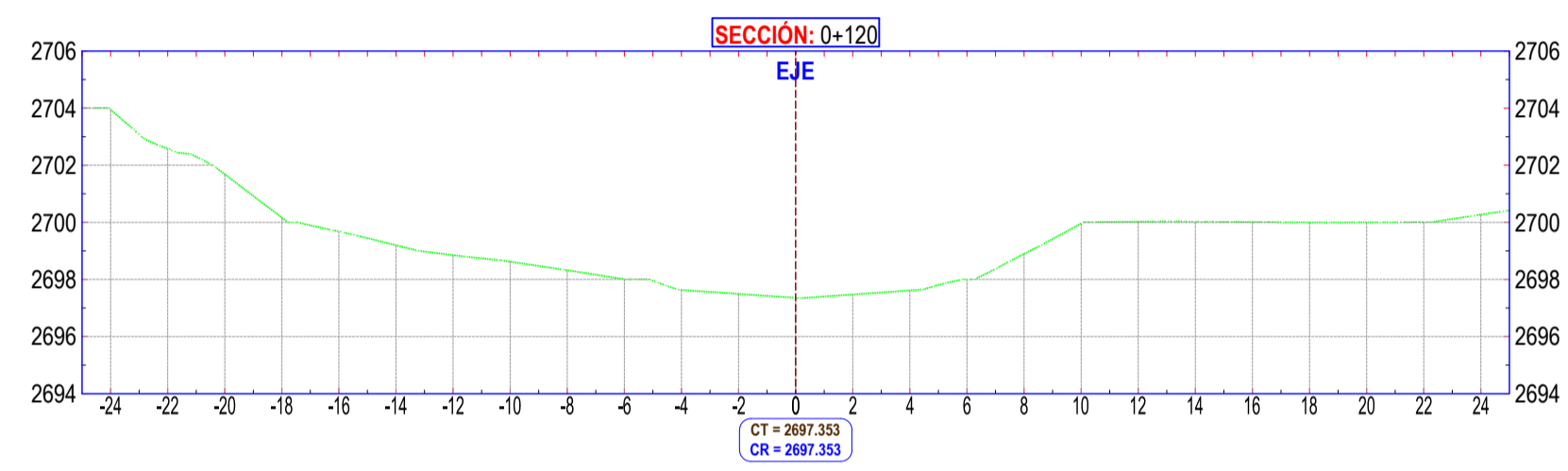
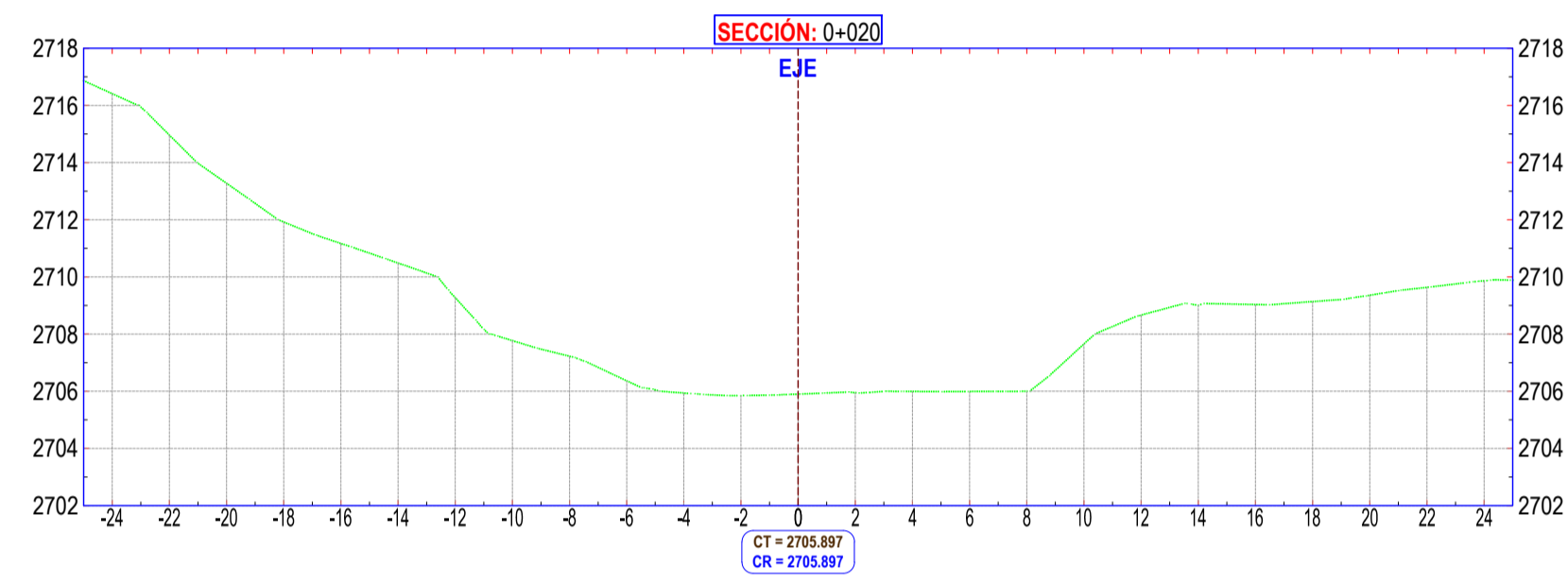
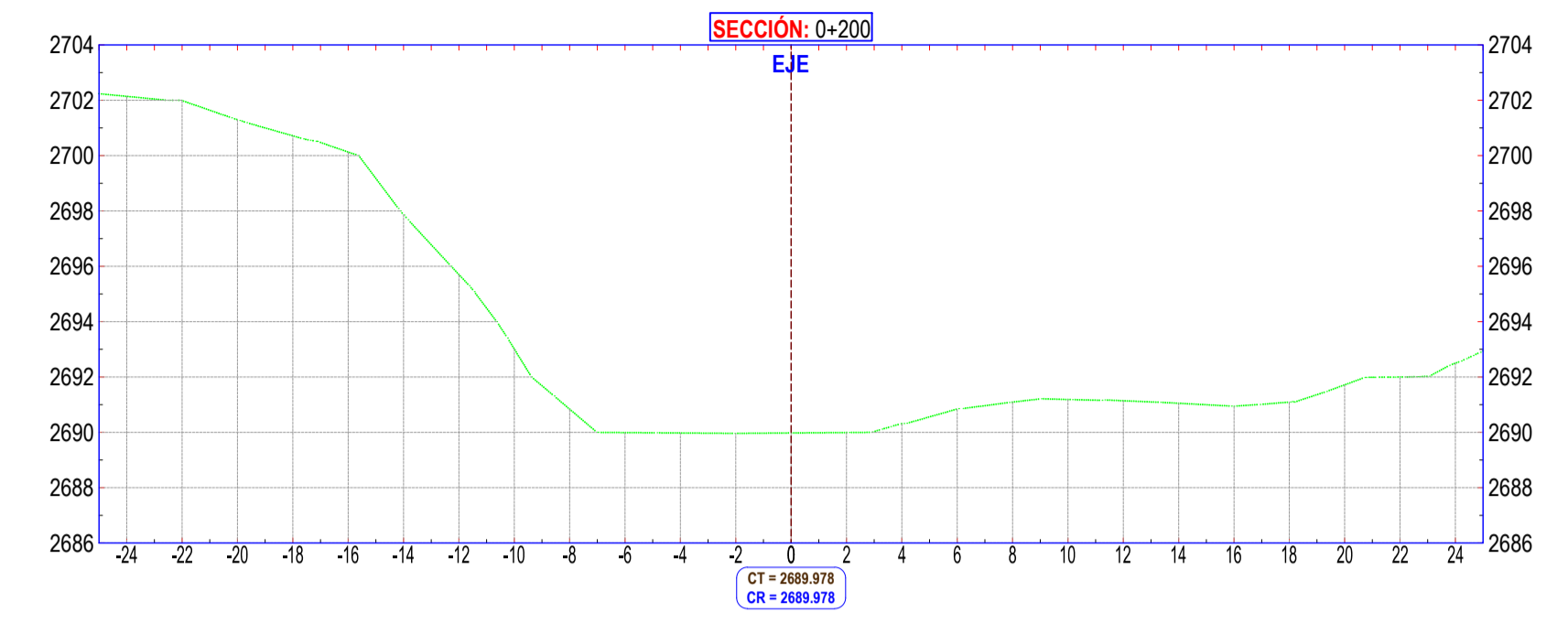
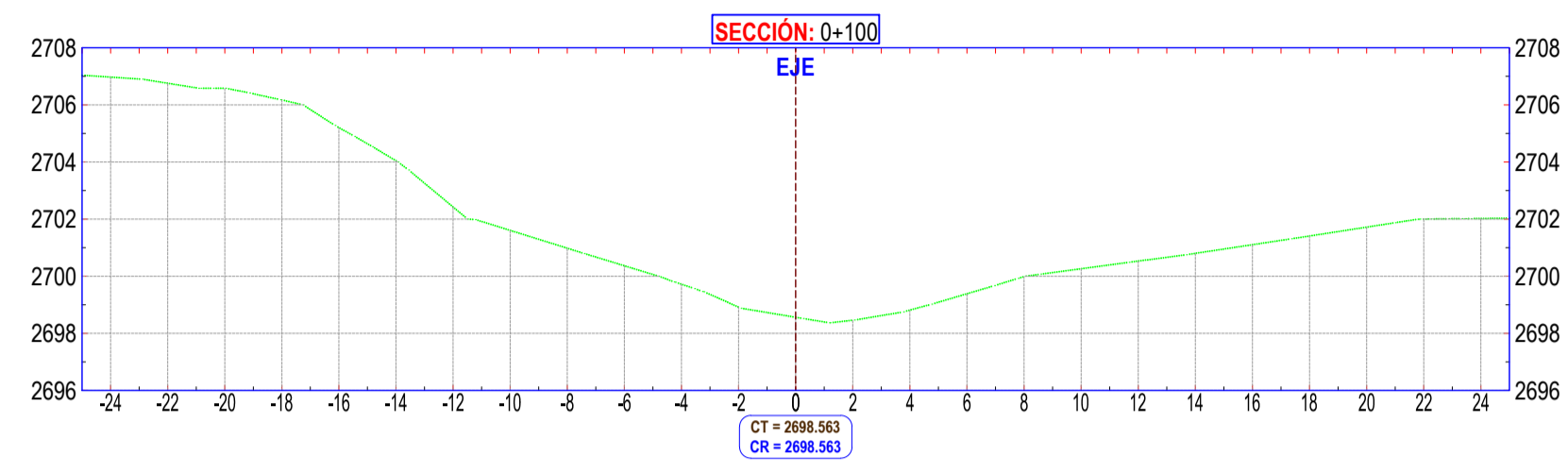
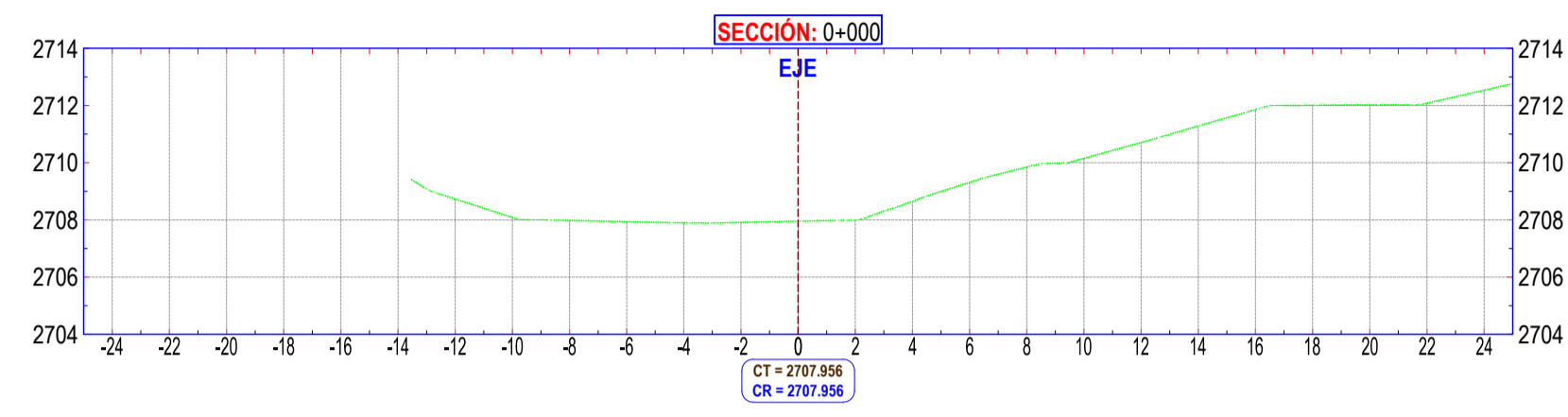
Lugar : Río Uscumayo  
Distrito : San Miguel  
Provincia : La Mar  
Departamento : Ayacucho

**PLANO: Plano Topografico**  
Planta - Perfil: Río Uscumayo - Prog. 0+000km @ 1+240km

**TESISTA: Ruth Lujan Gutierrez**

**FECHA: febrero-2025**      **ESCALA: indicado**

**LAMINA:**  
**PP-01**



**UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA**  
**I.P. INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**TESIS:**  
"Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel - La Mar, 2024"

**UBICACIÓN:**

Lugar : Río Ucumayo  
Distrito : San Miguel  
Provincia : La Mar  
Departamento : Ayacucho

**PLANO: Plano Topográfico**

Secciones transversales-Río Ucumayo- Prog. 0+000km @ 0+260km

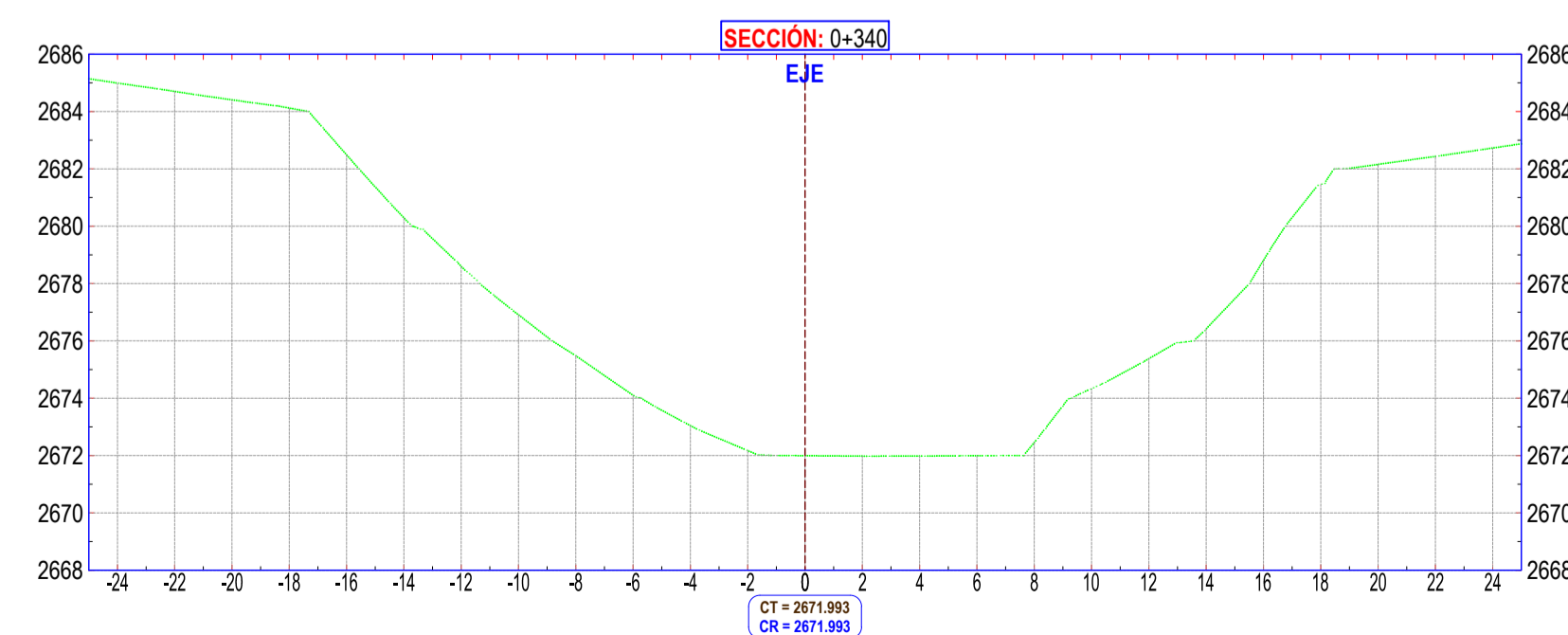
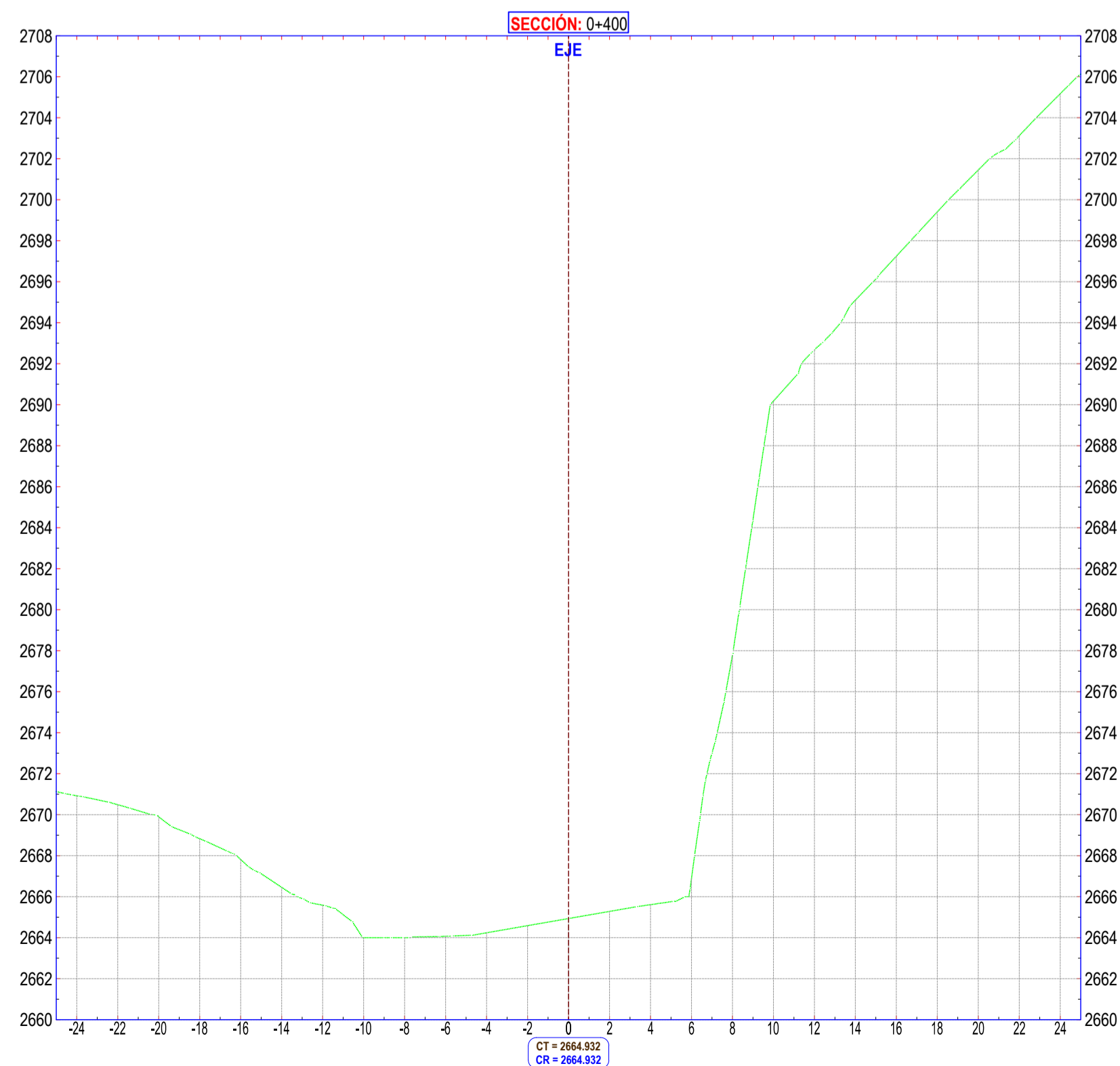
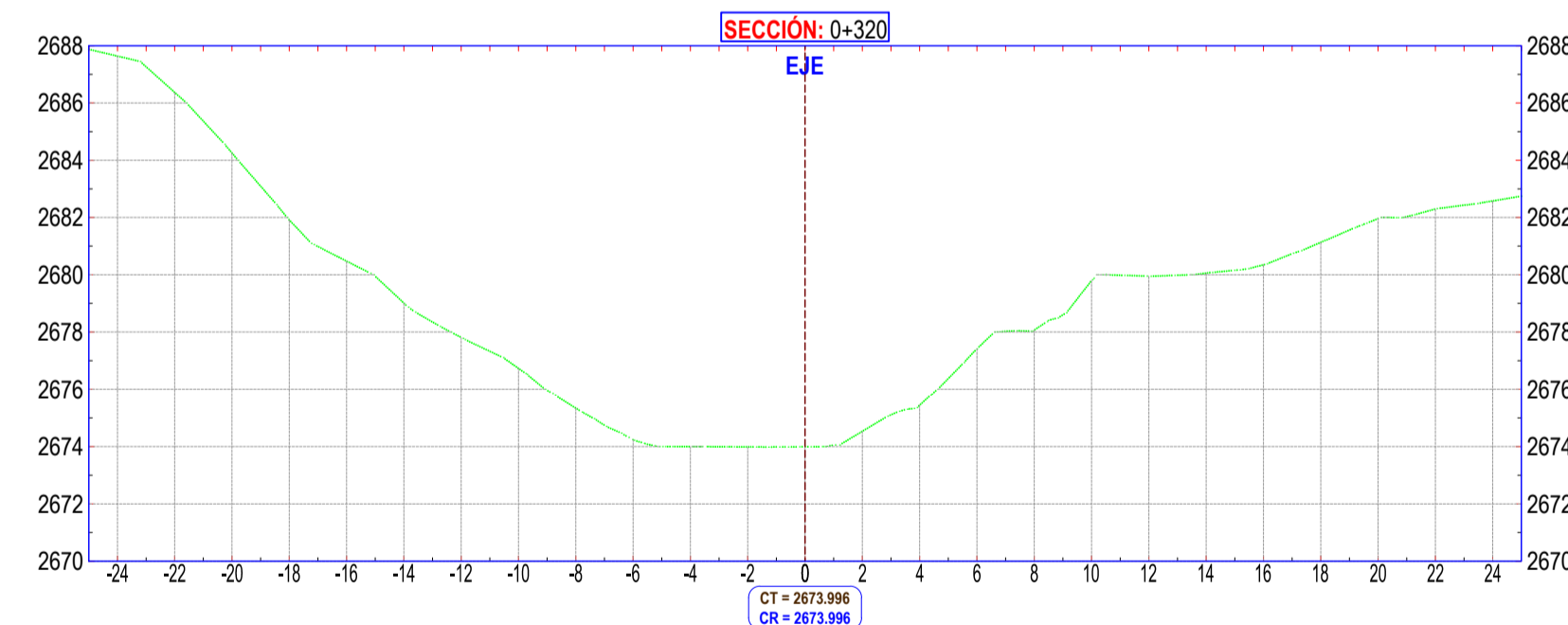
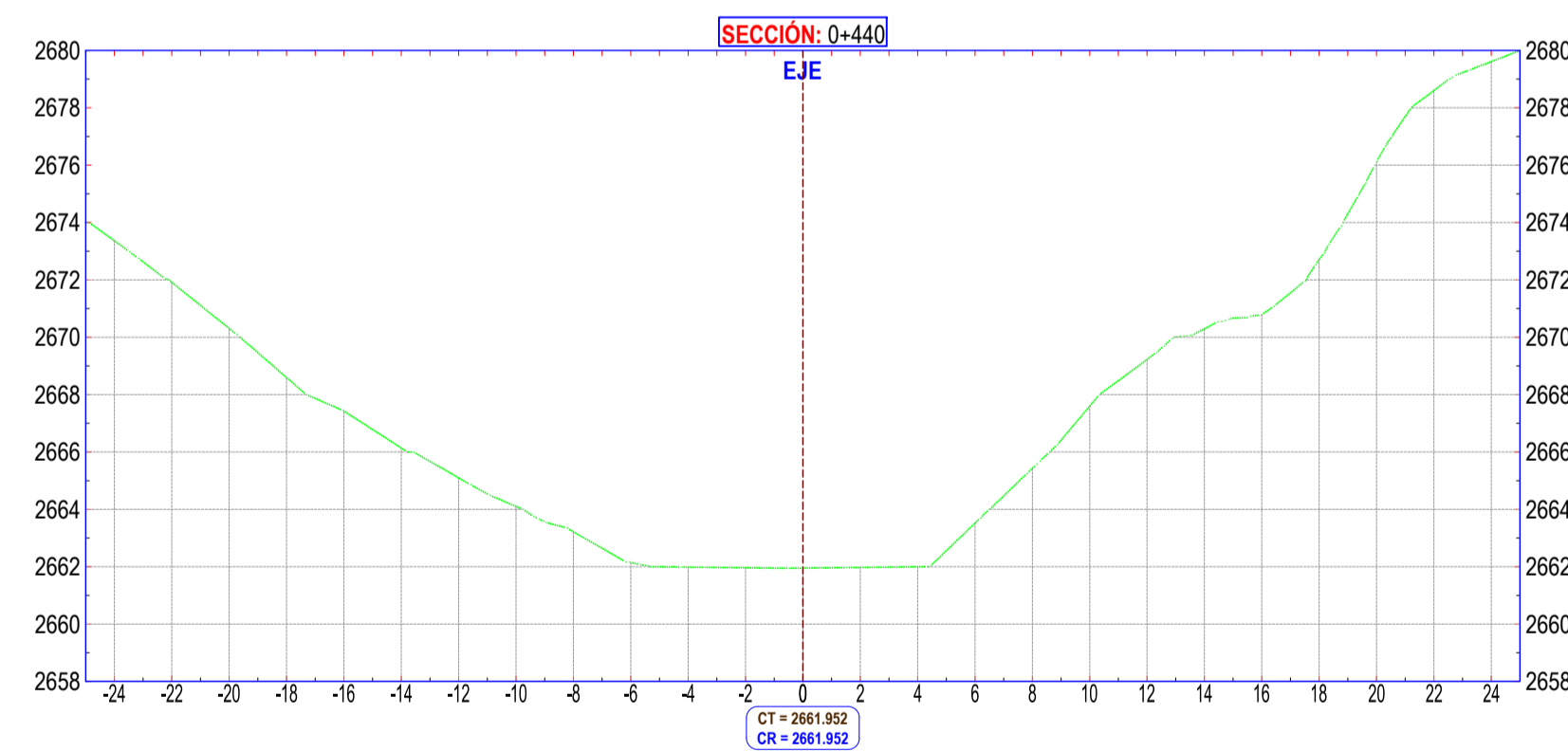
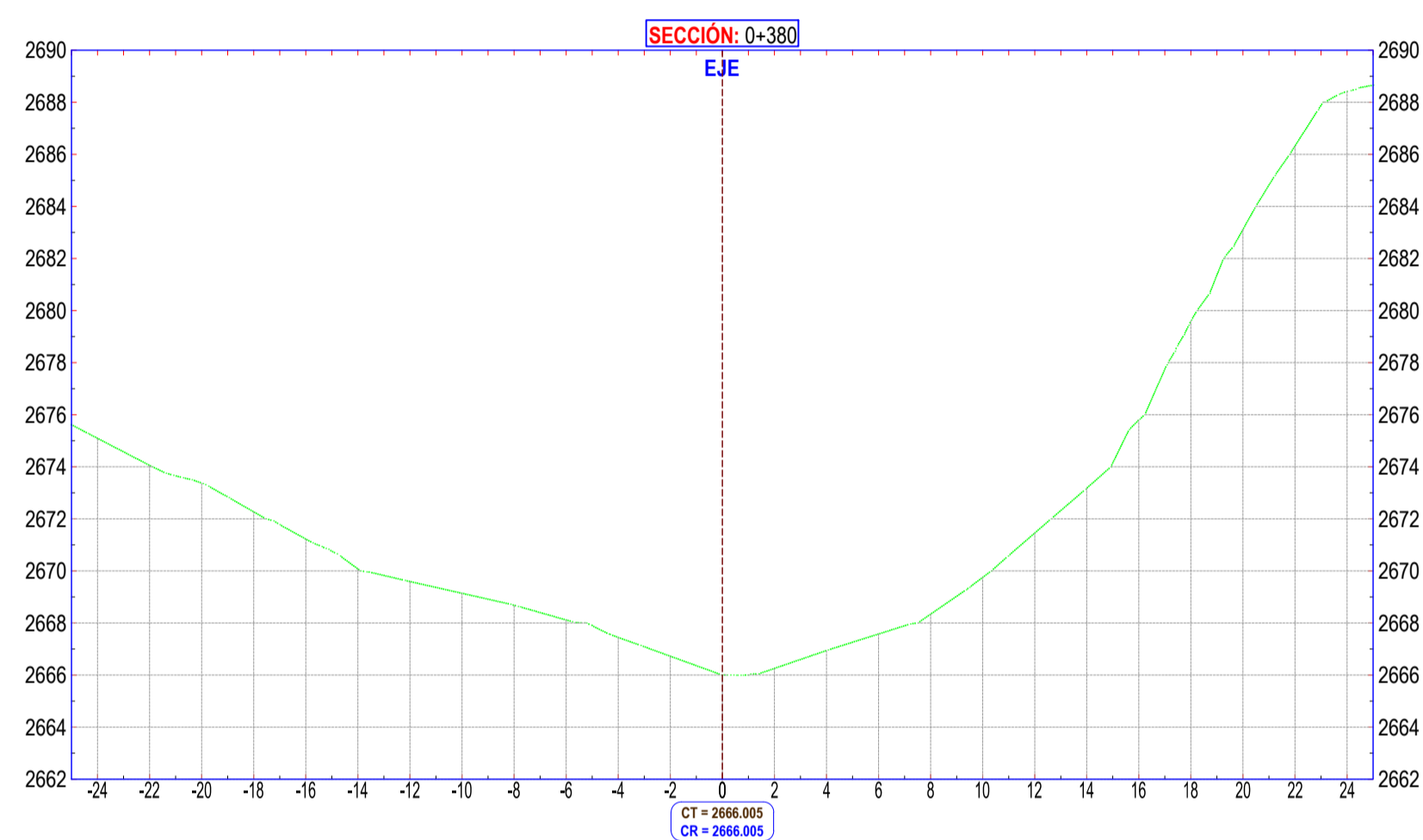
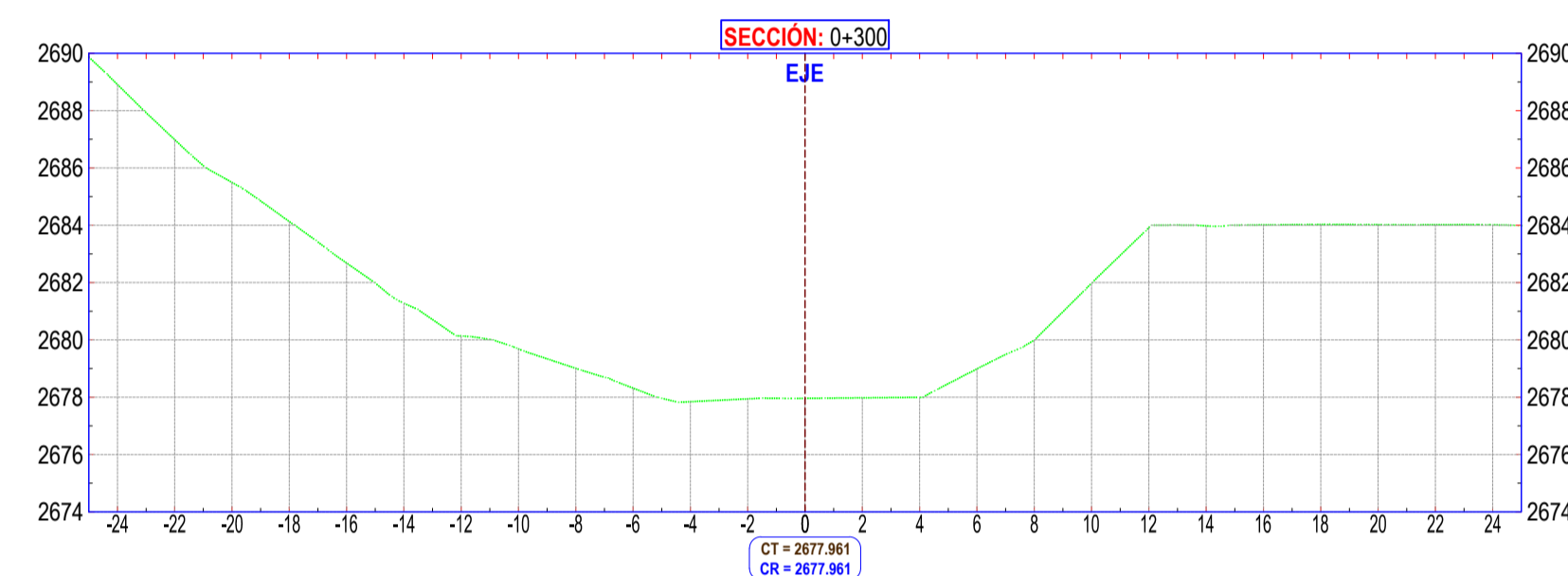
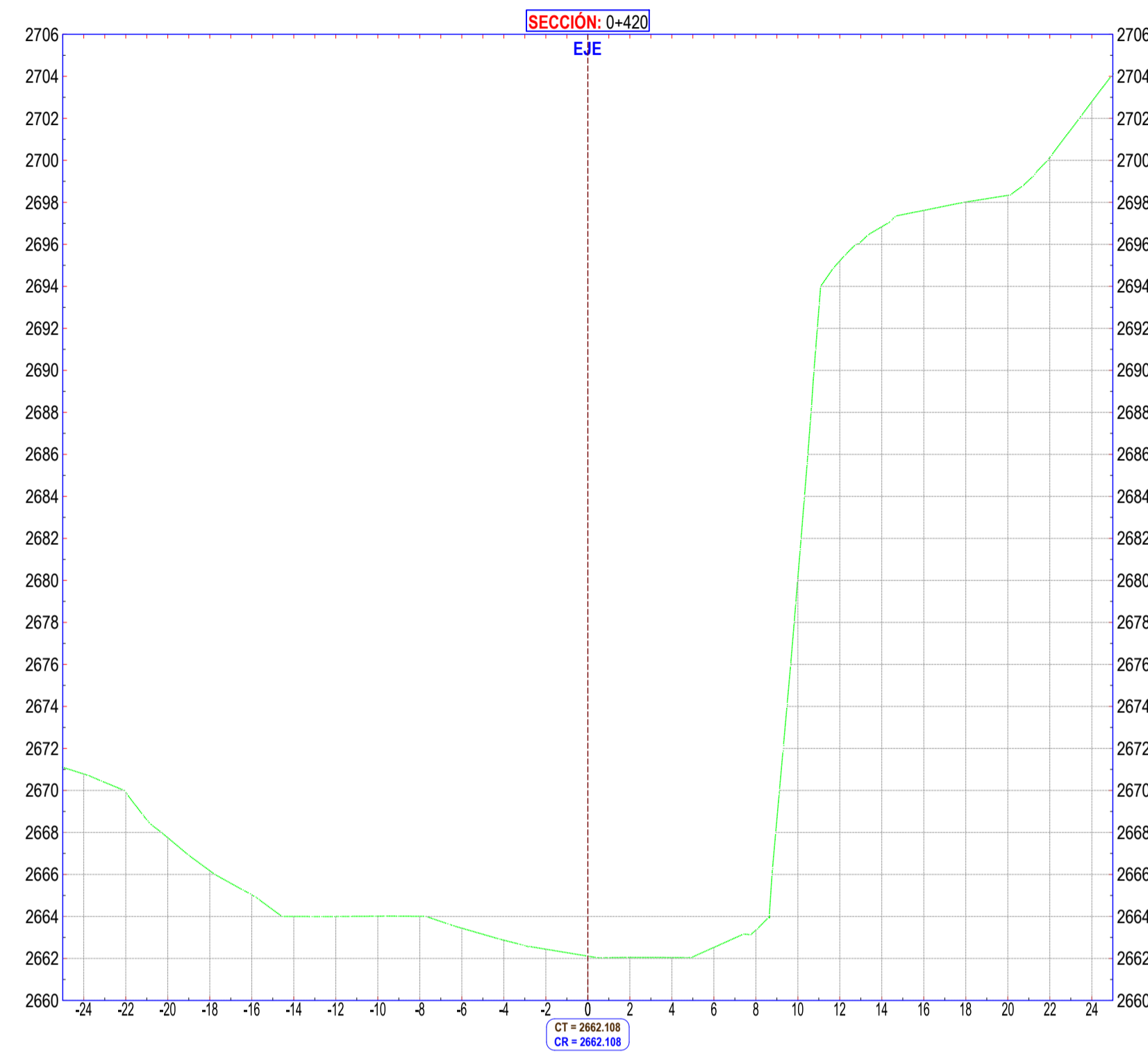
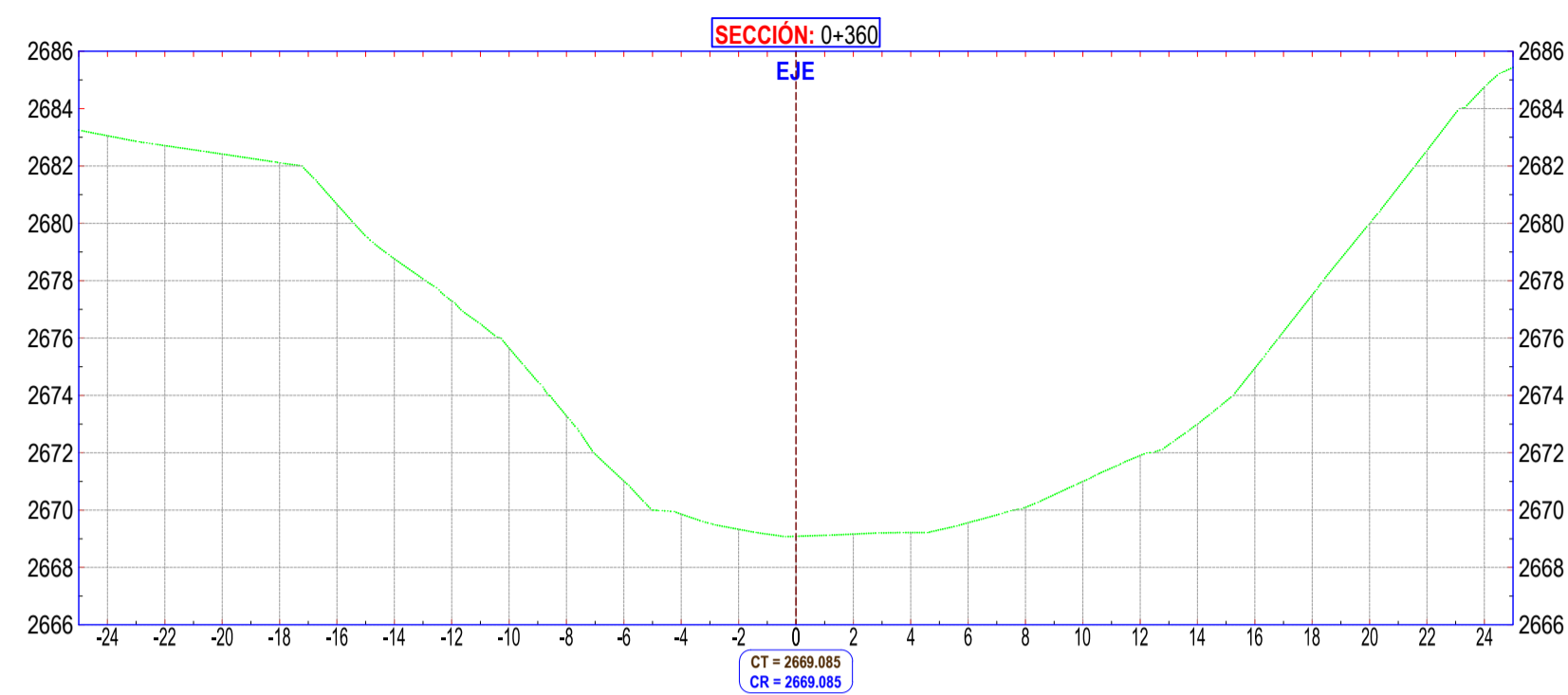
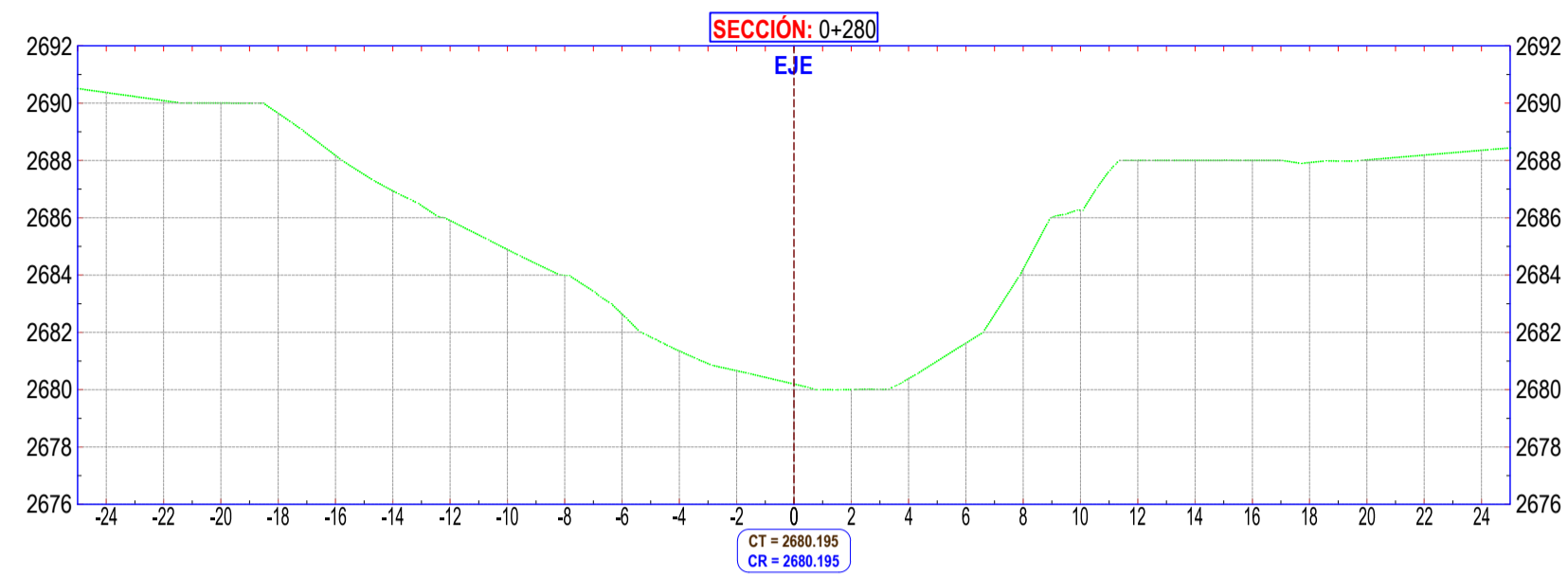
**TESISTA: Ruth Lujan Gutiérrez**

**FECHA: febrero-2025**

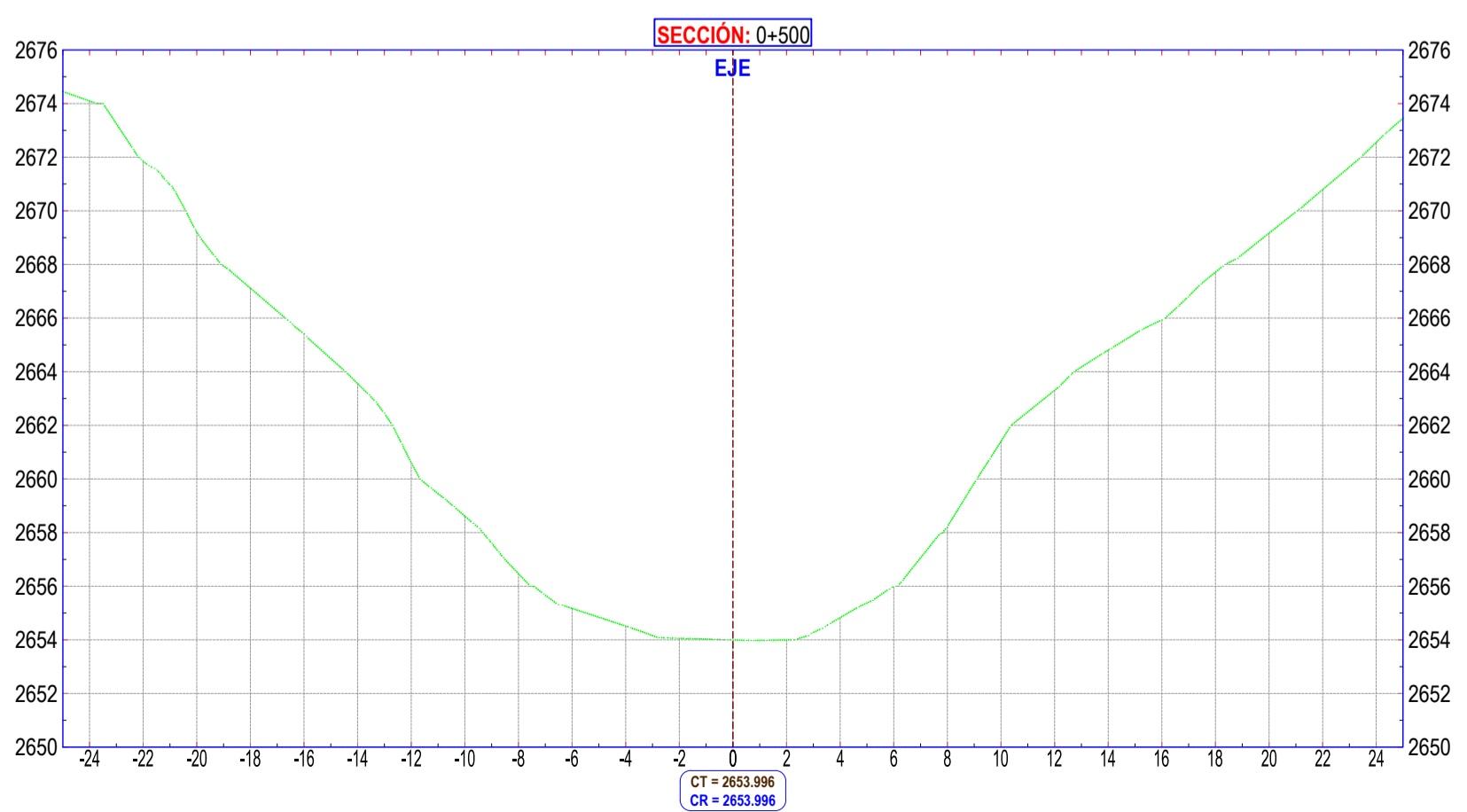
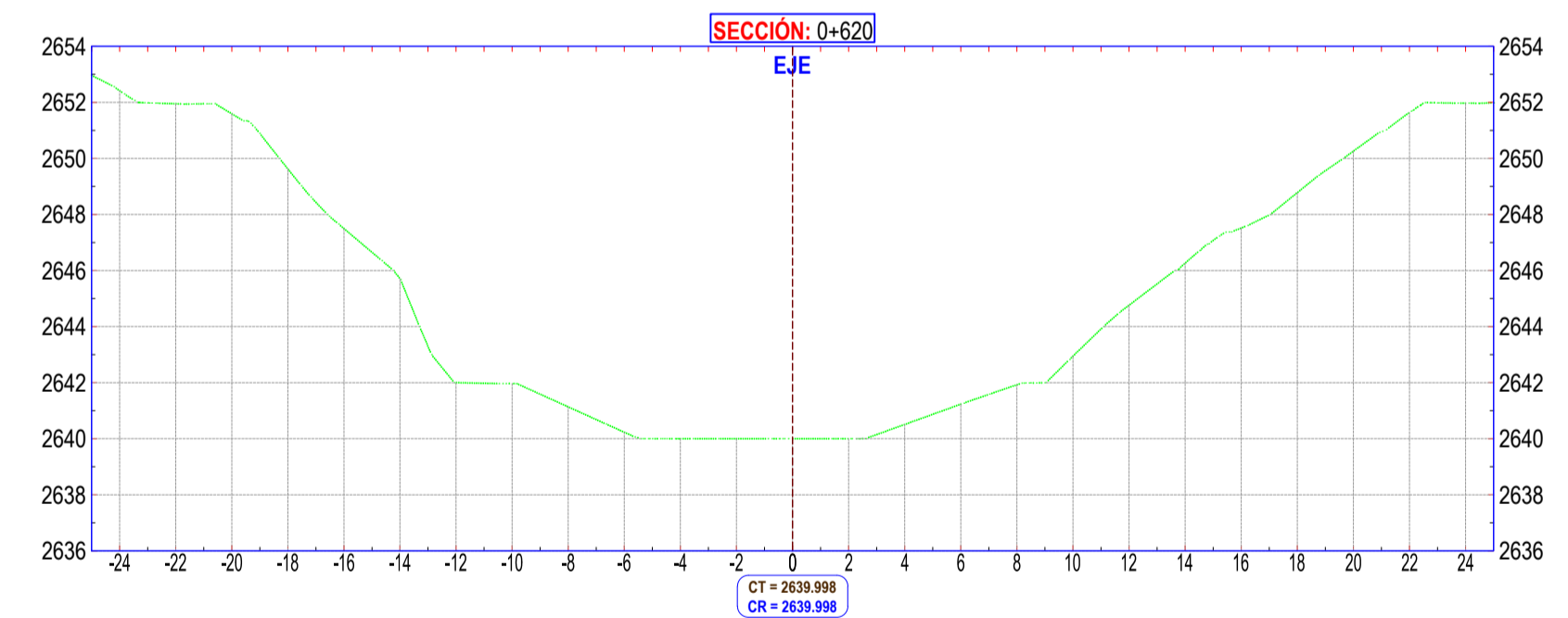
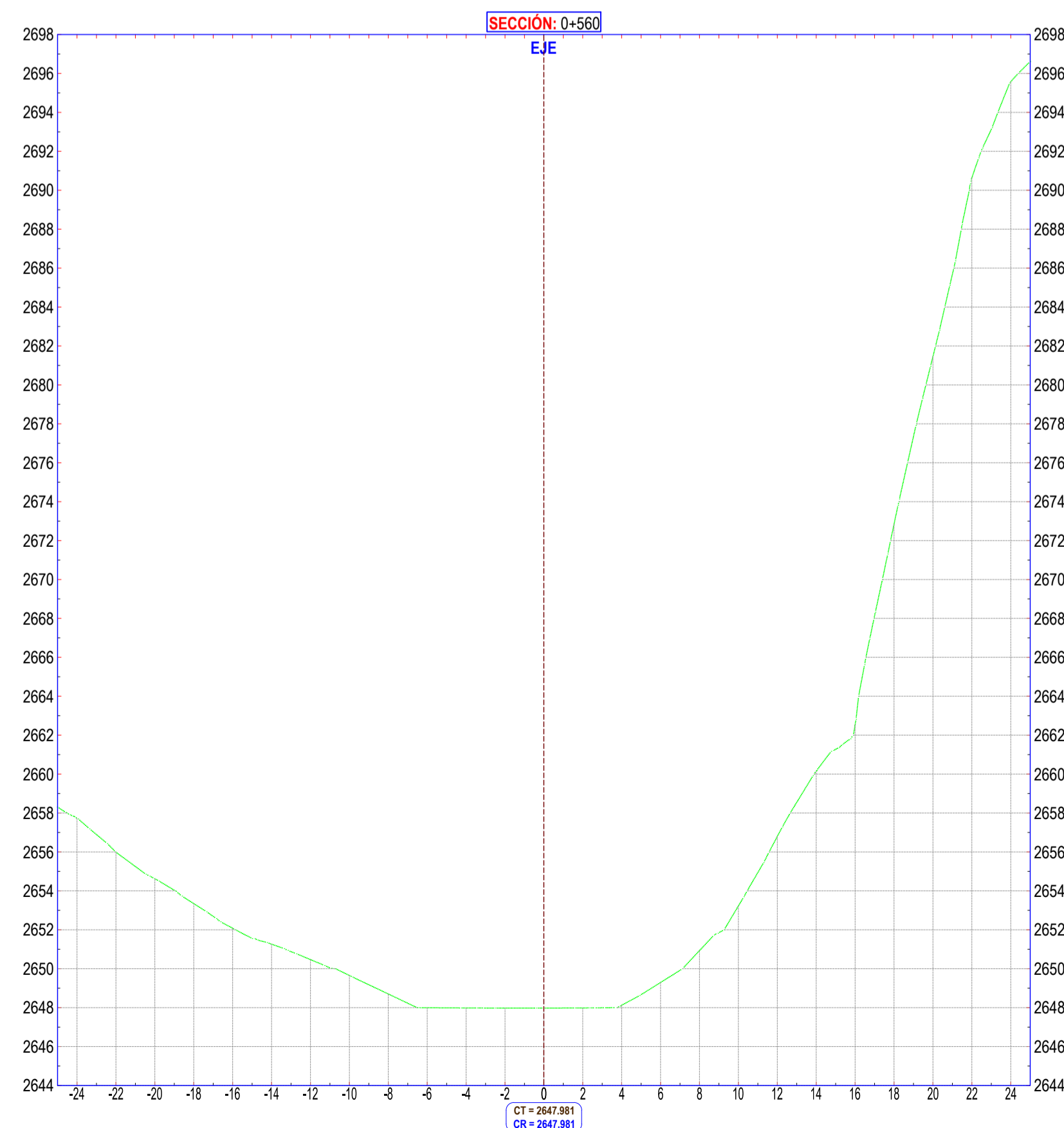
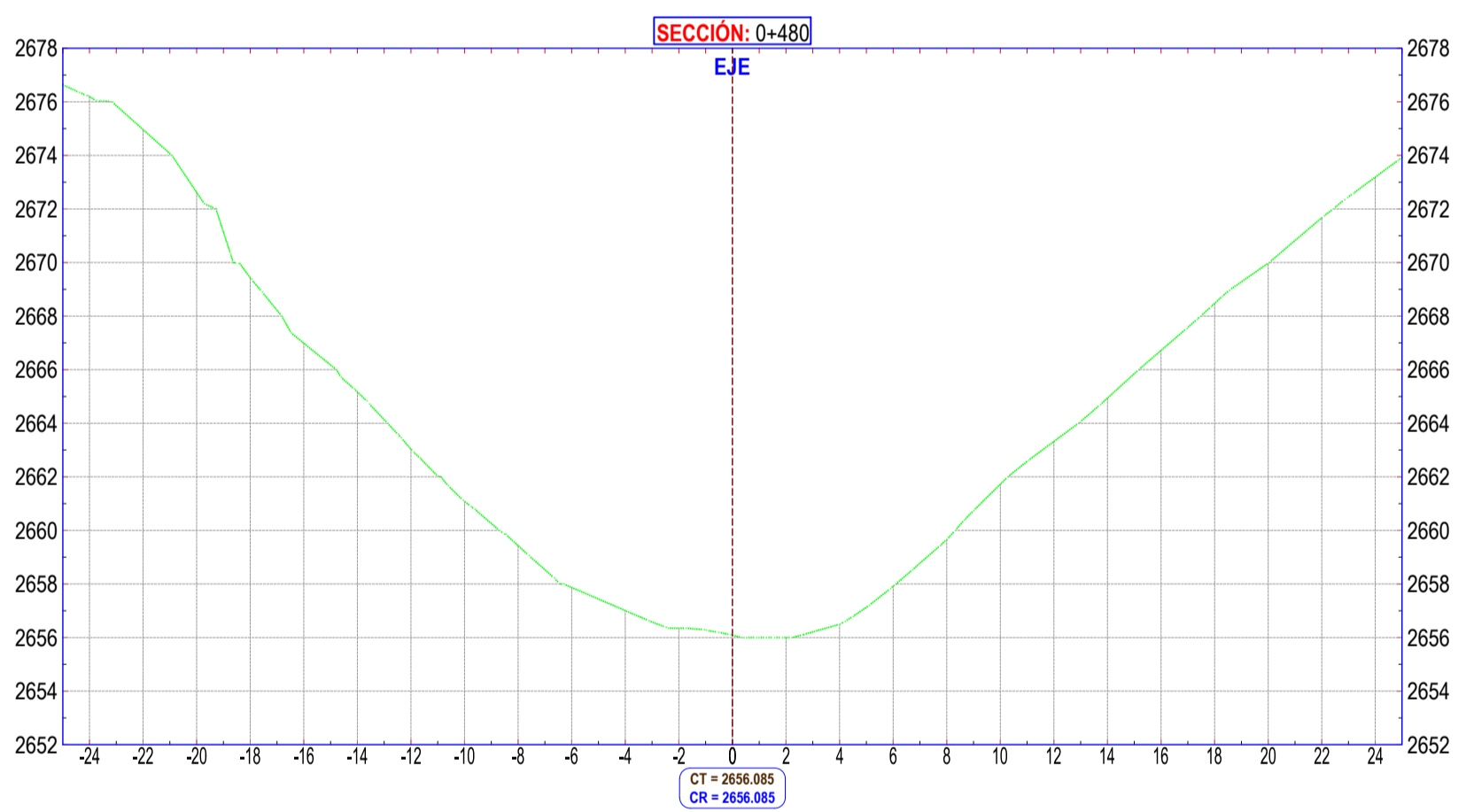
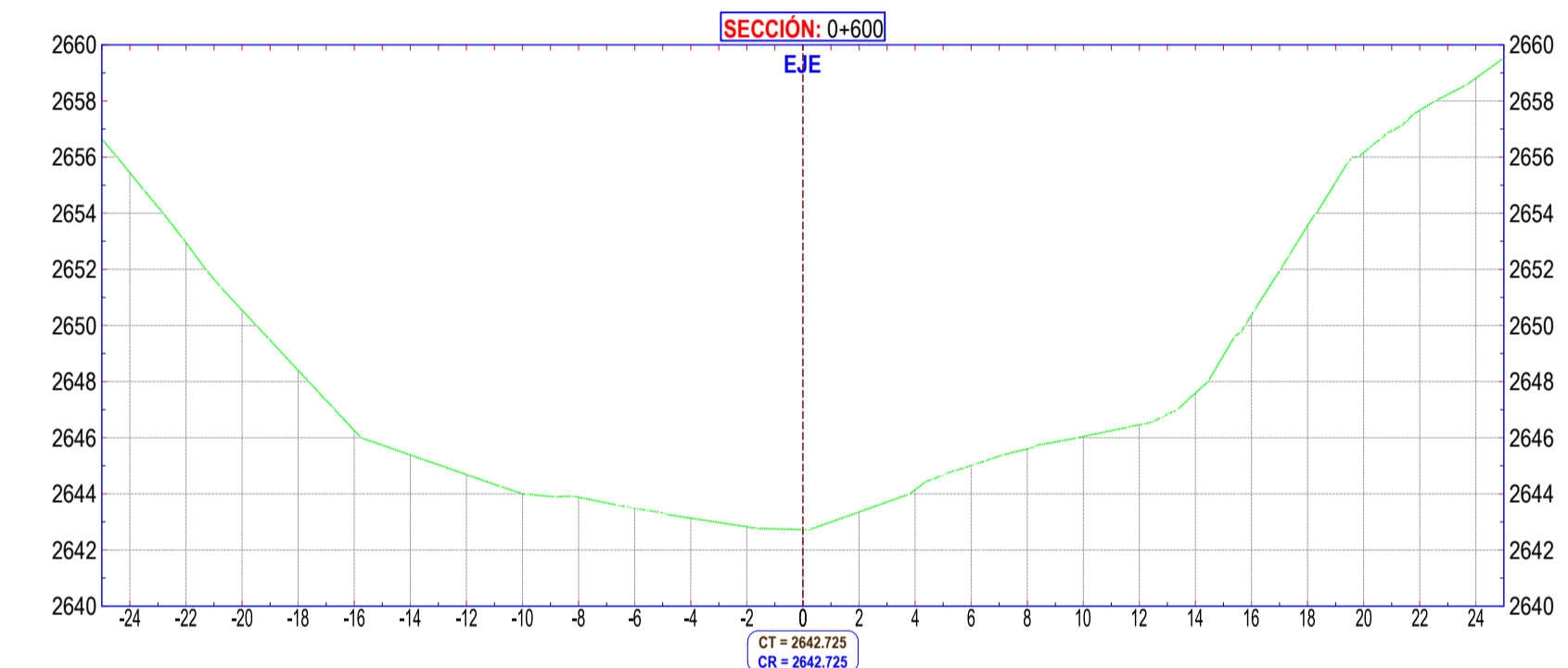
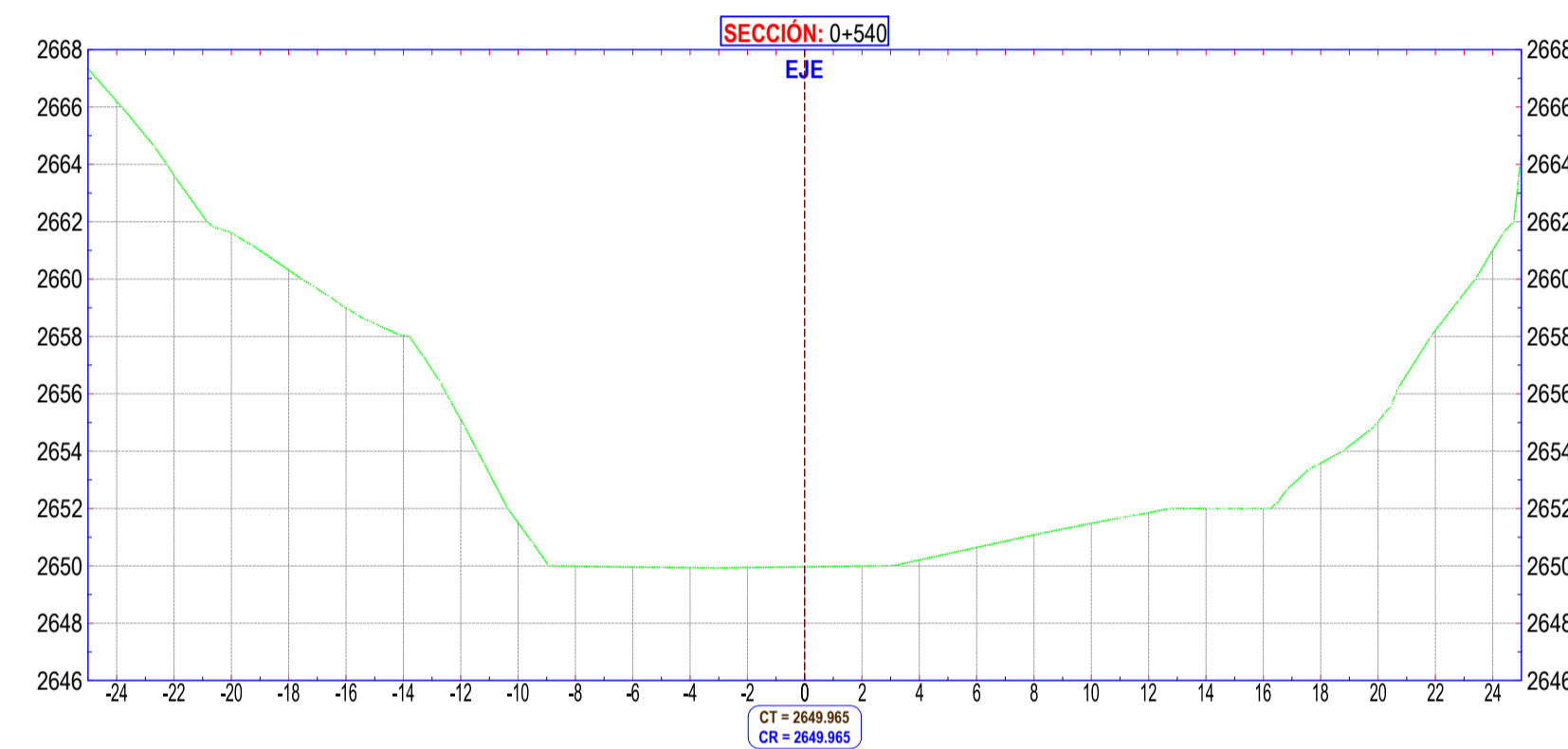
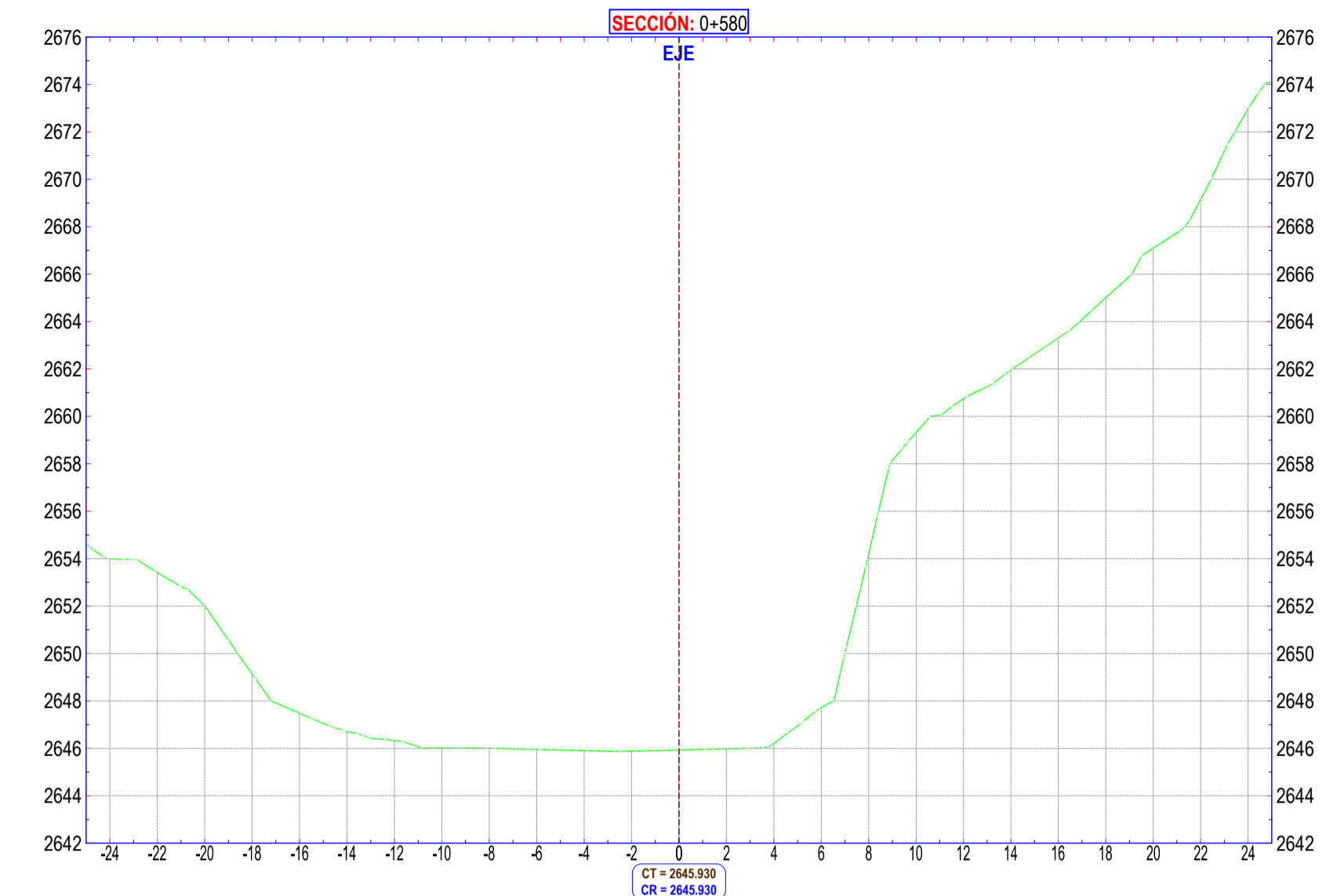
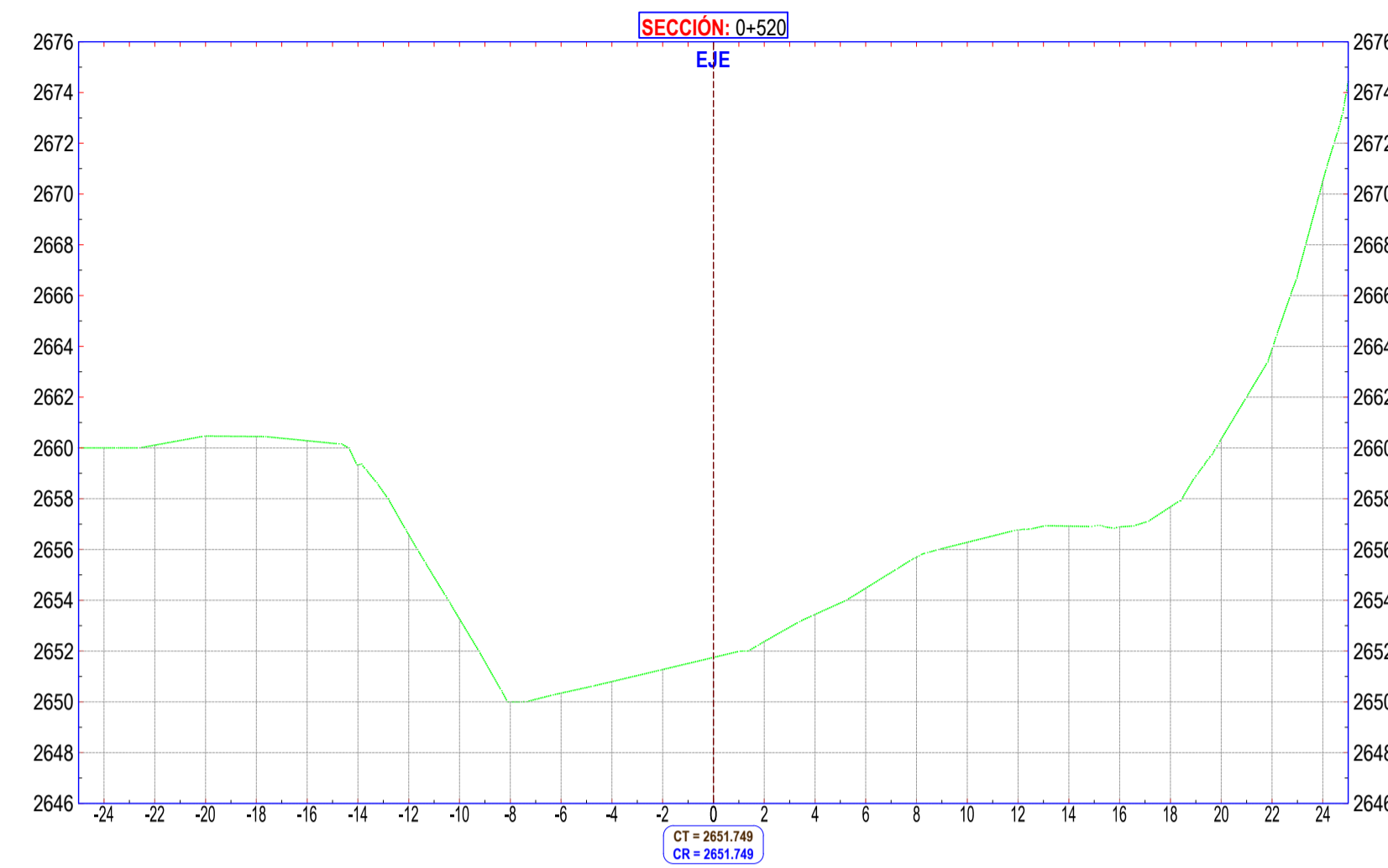
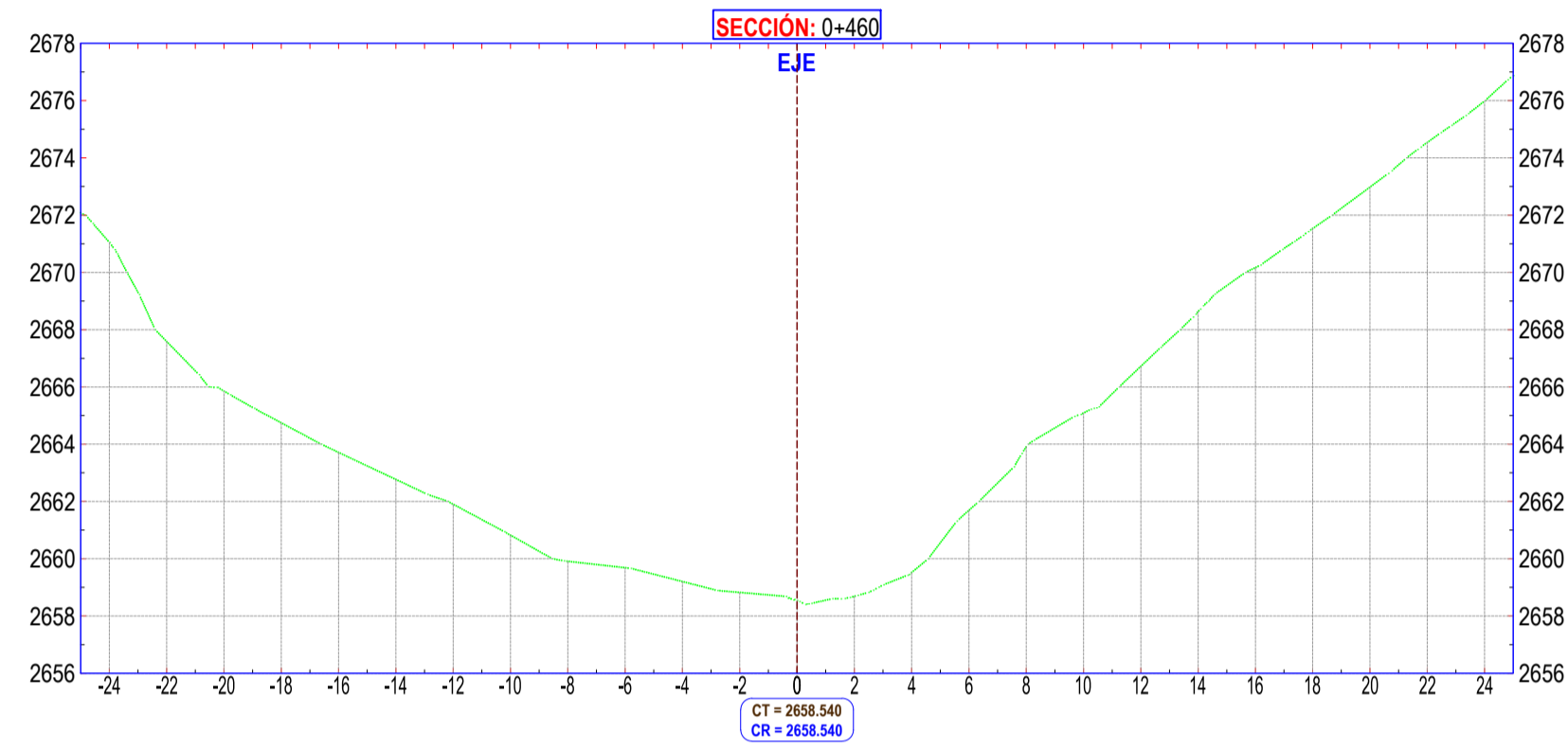
**ESCALA: indicado**

**LAMINA:**

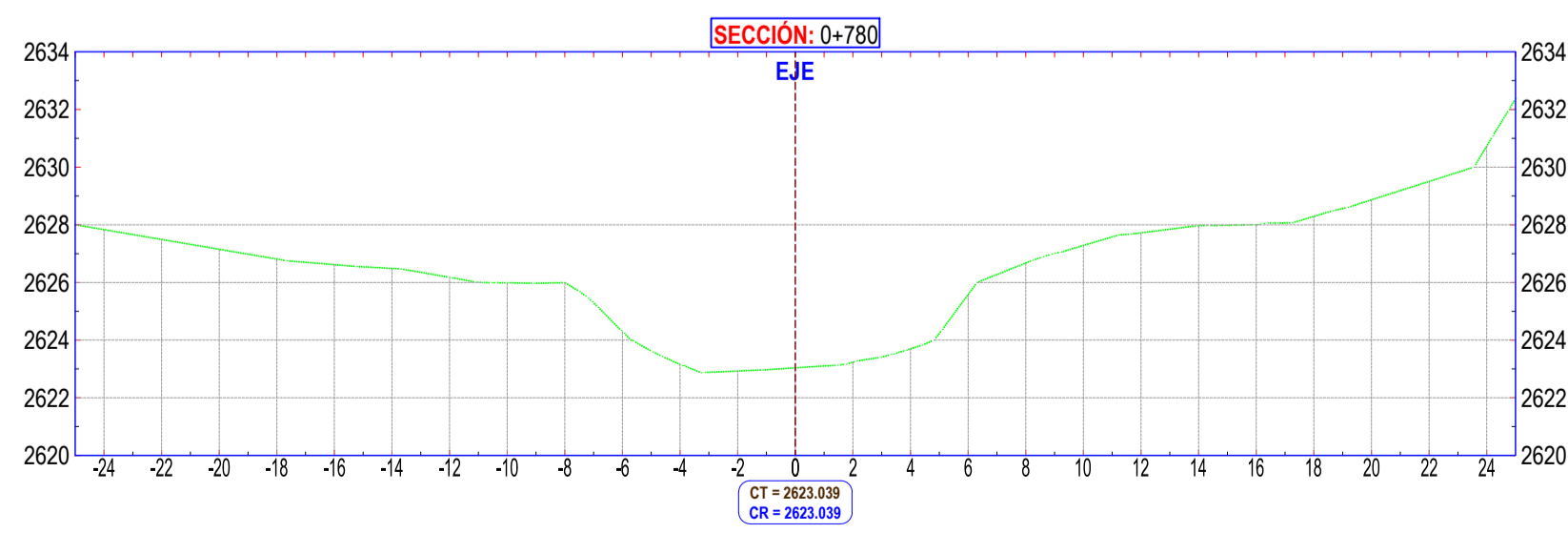
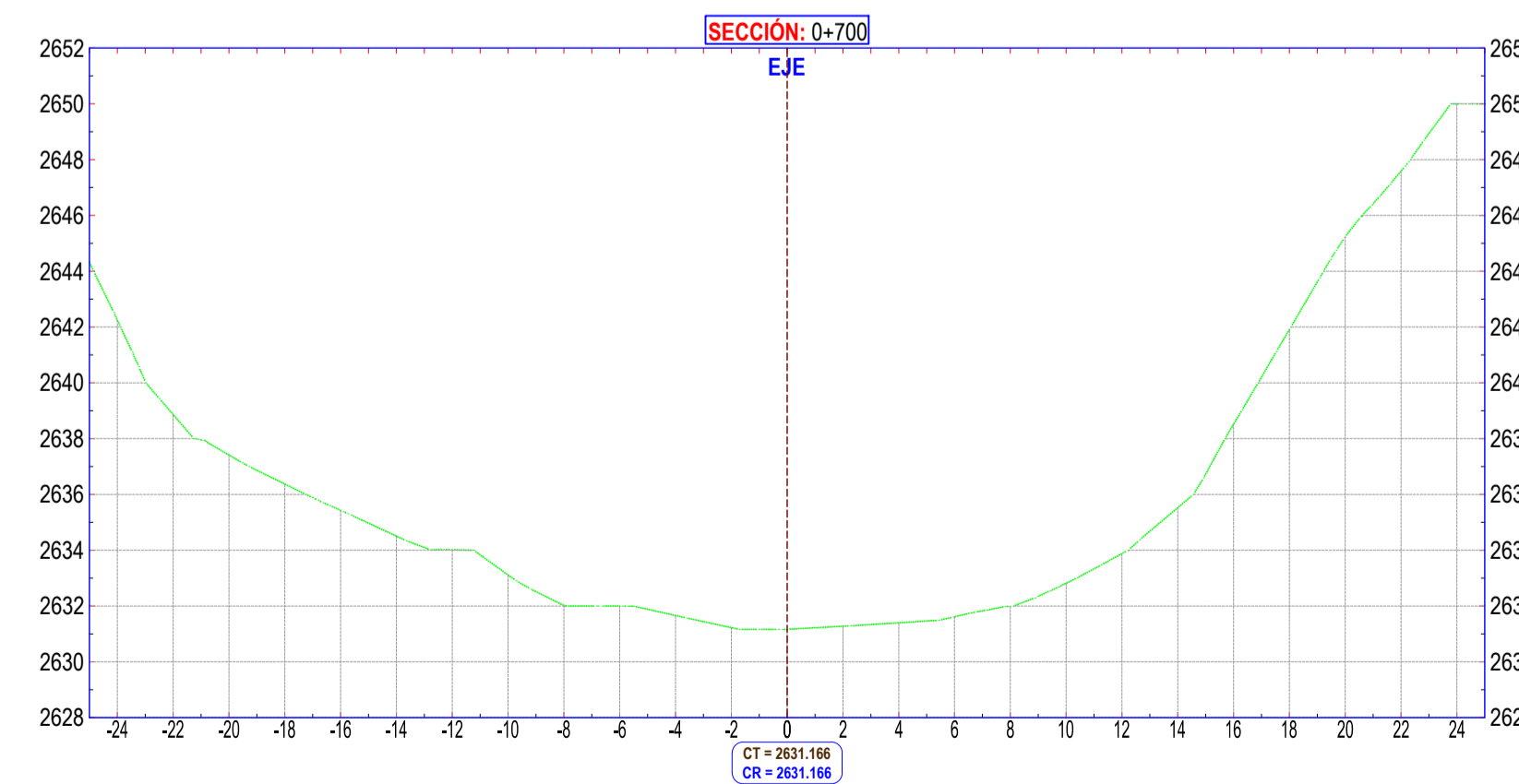
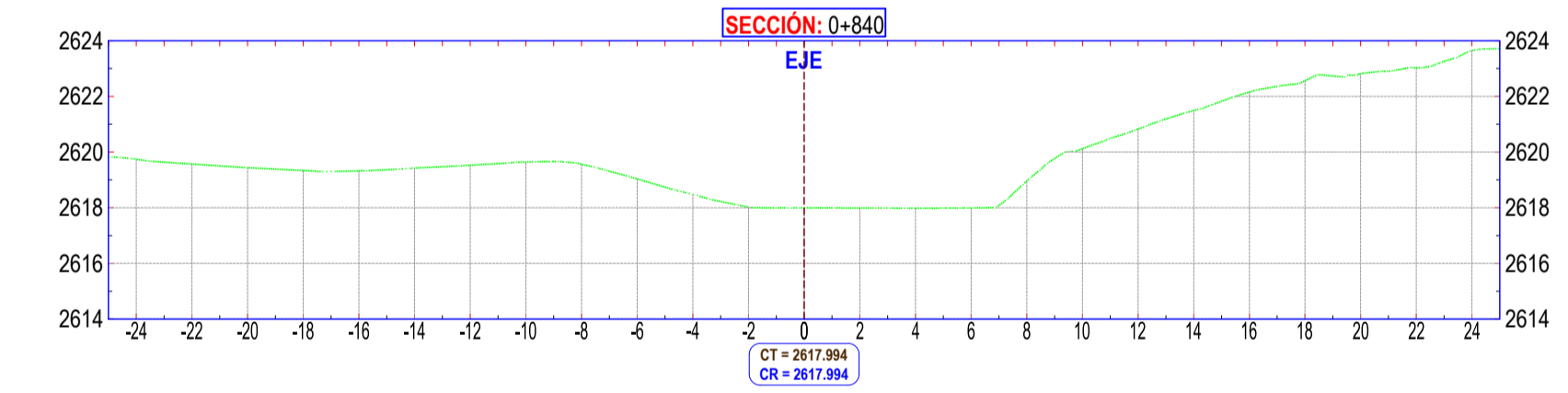
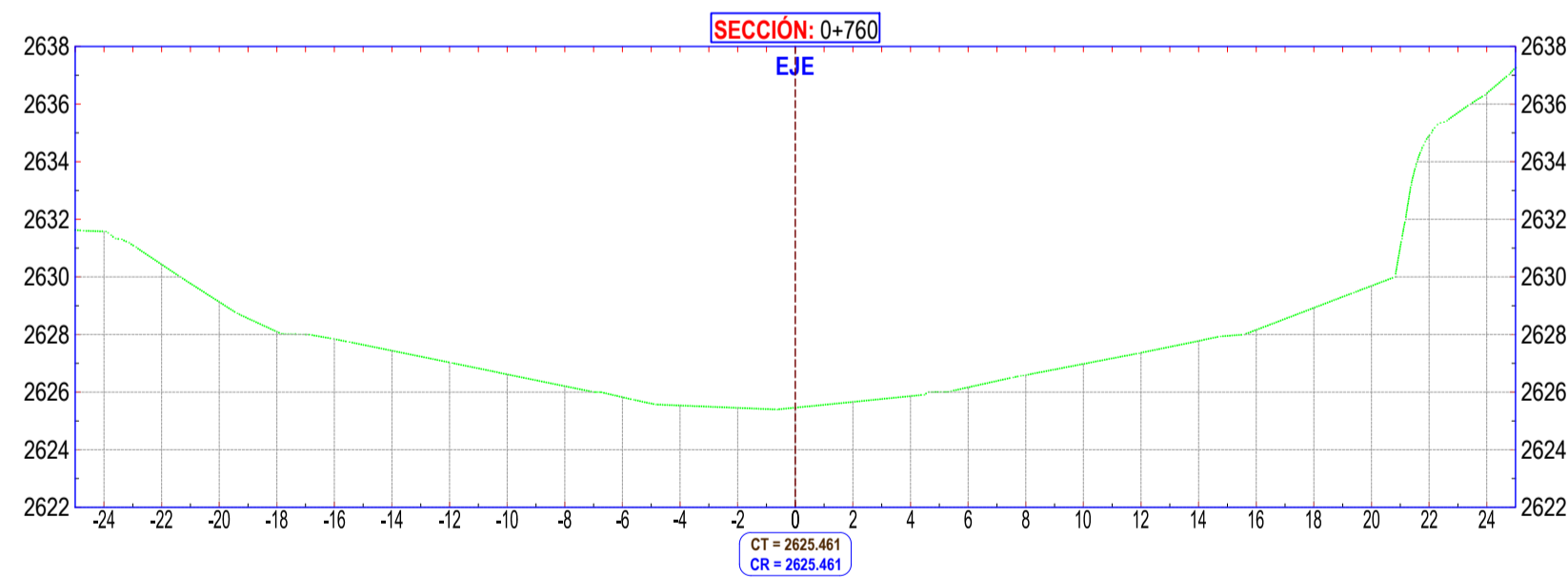
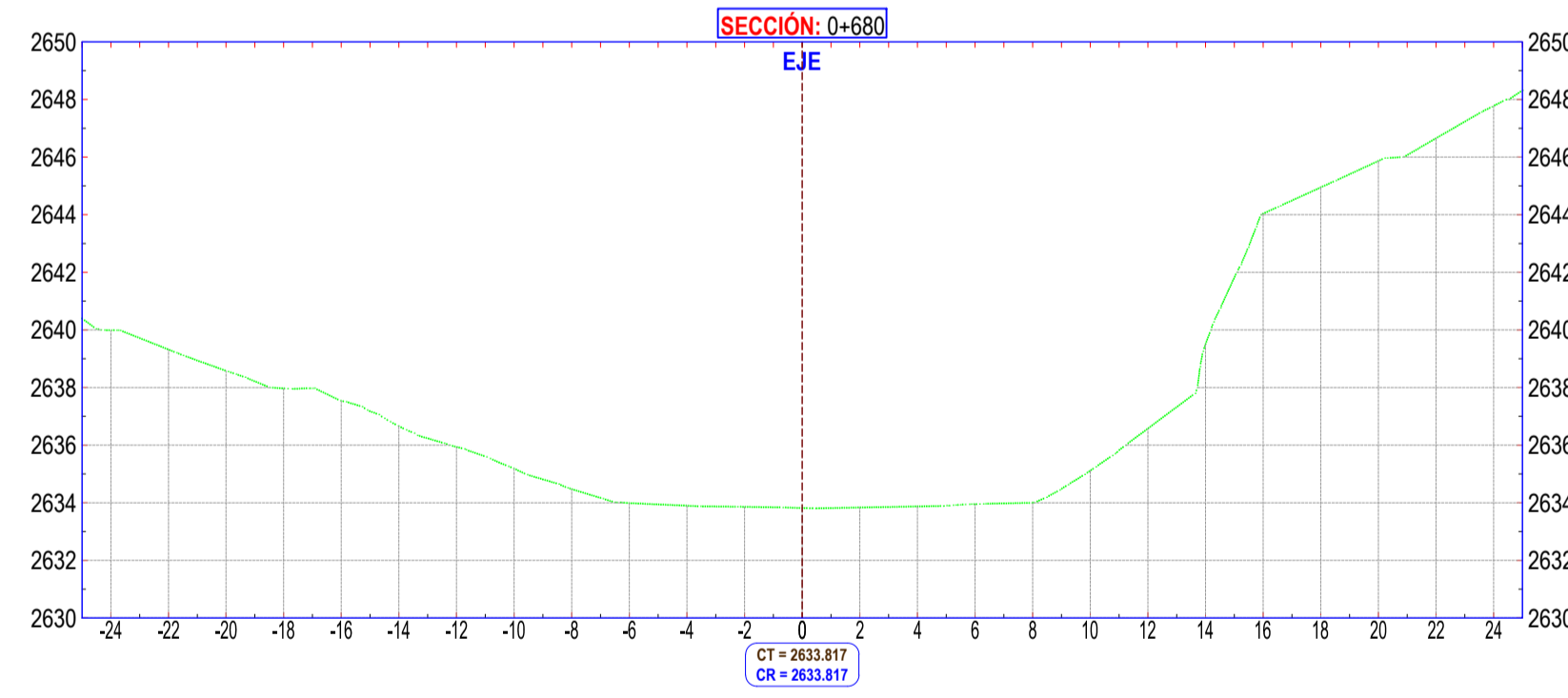
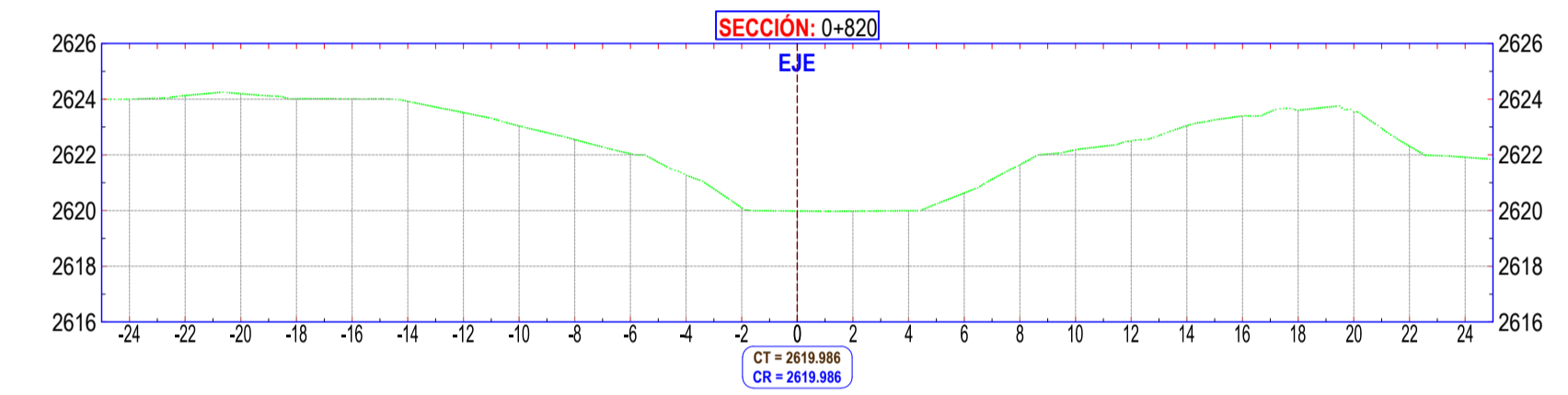
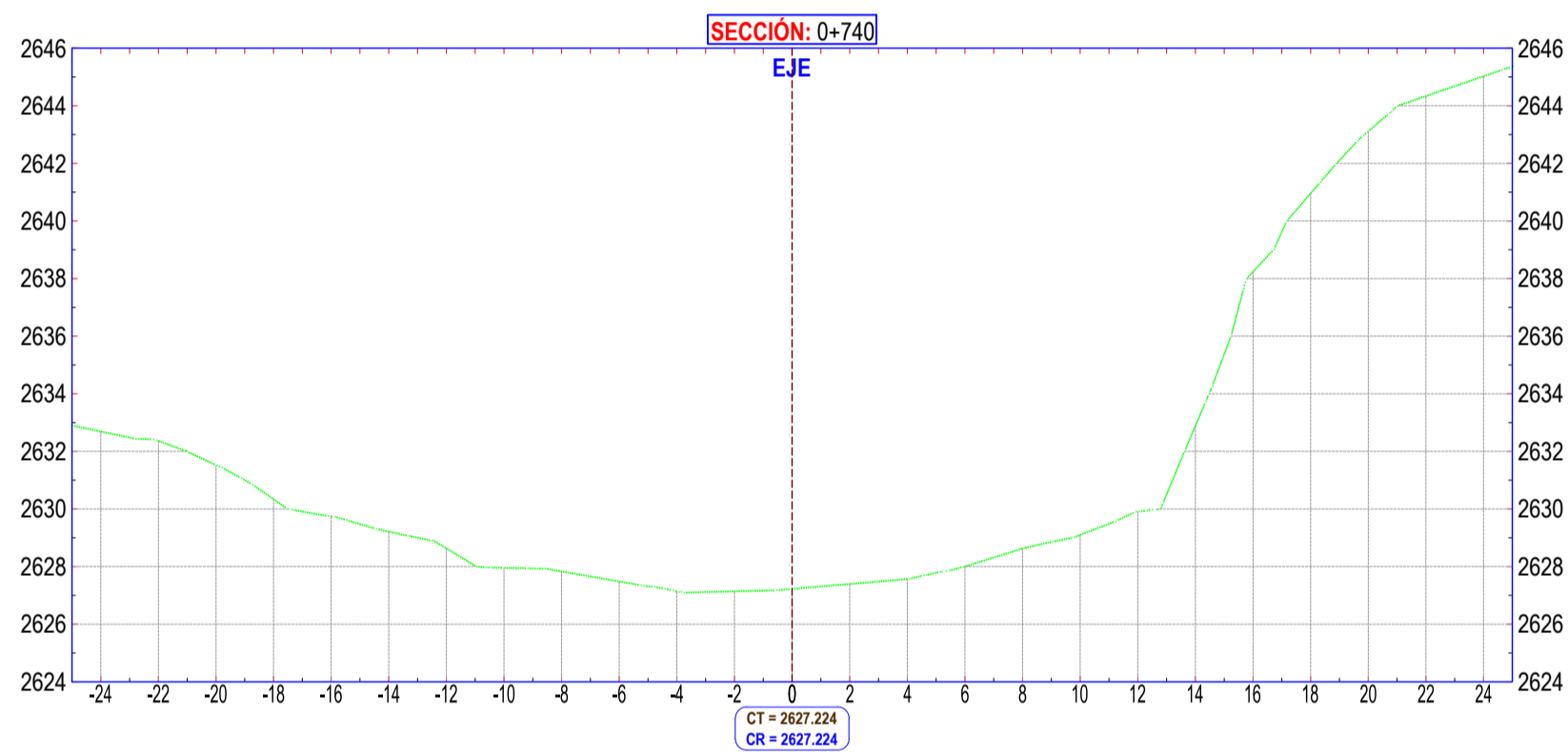
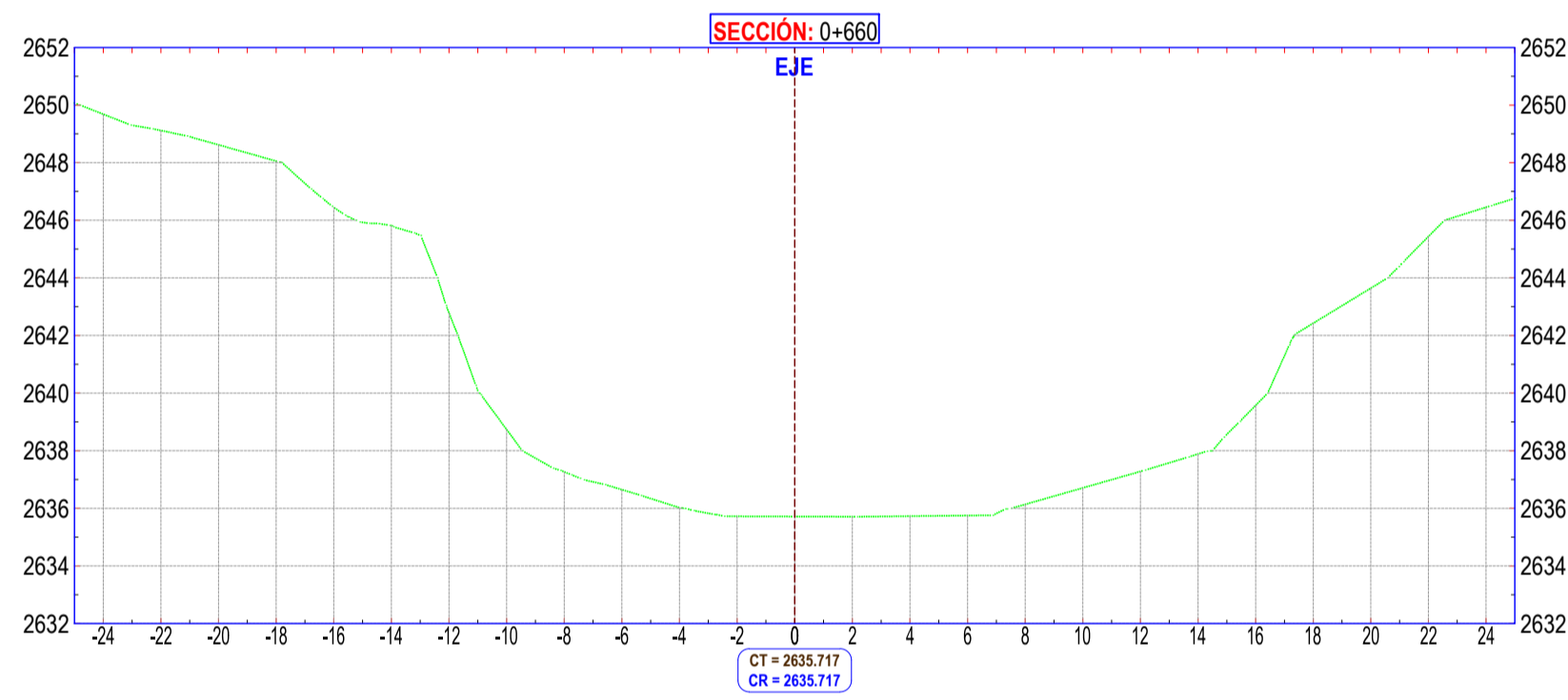
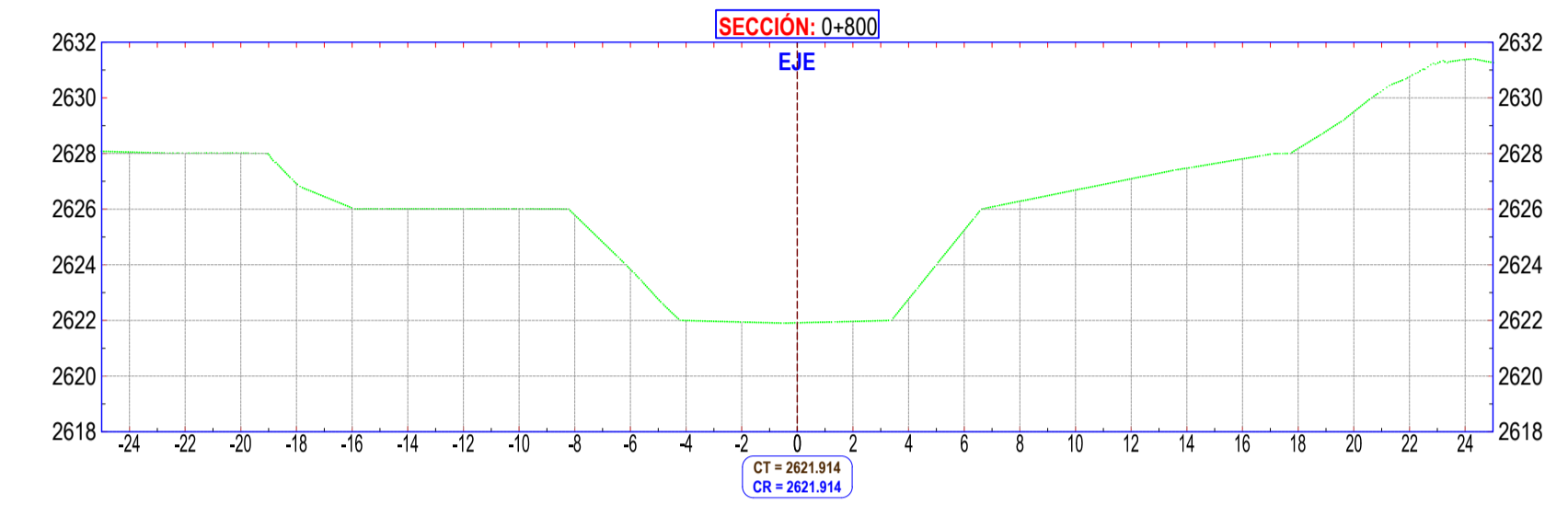
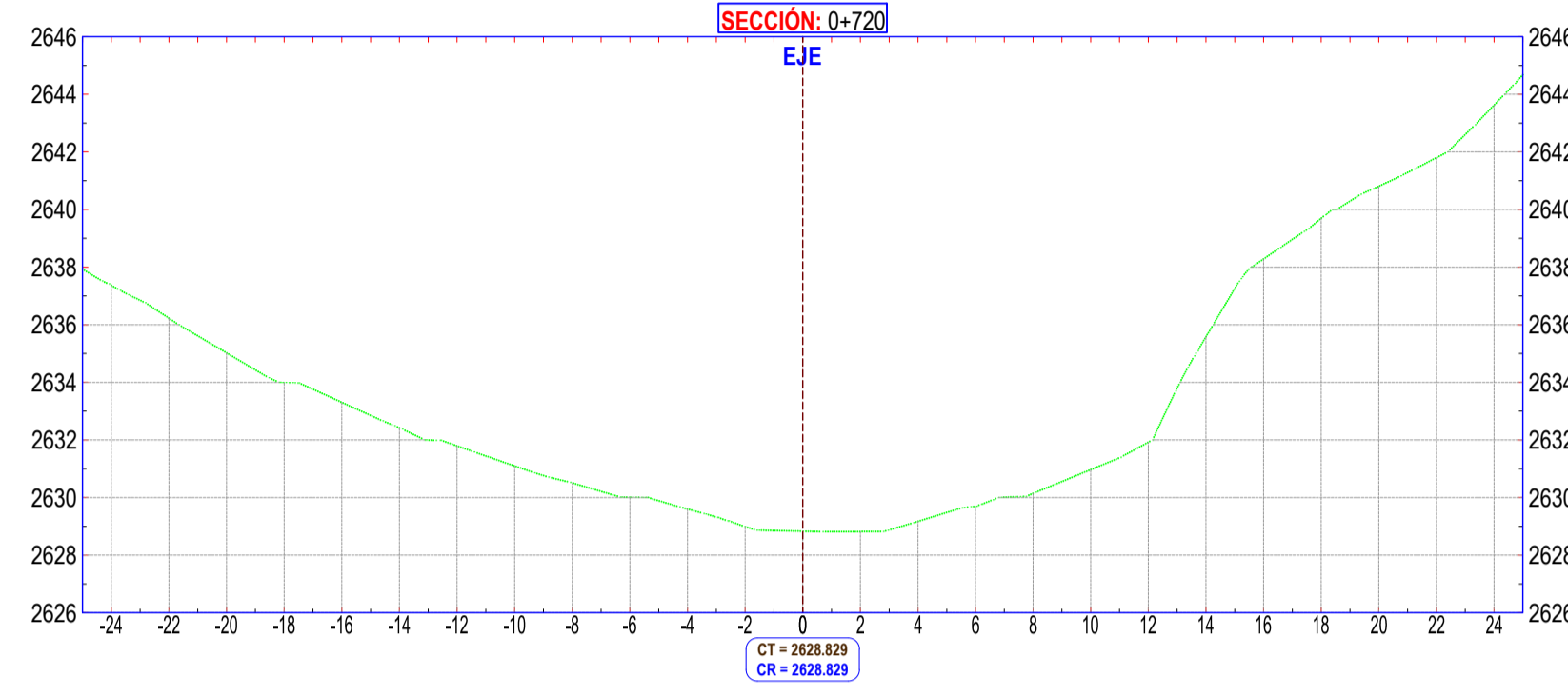
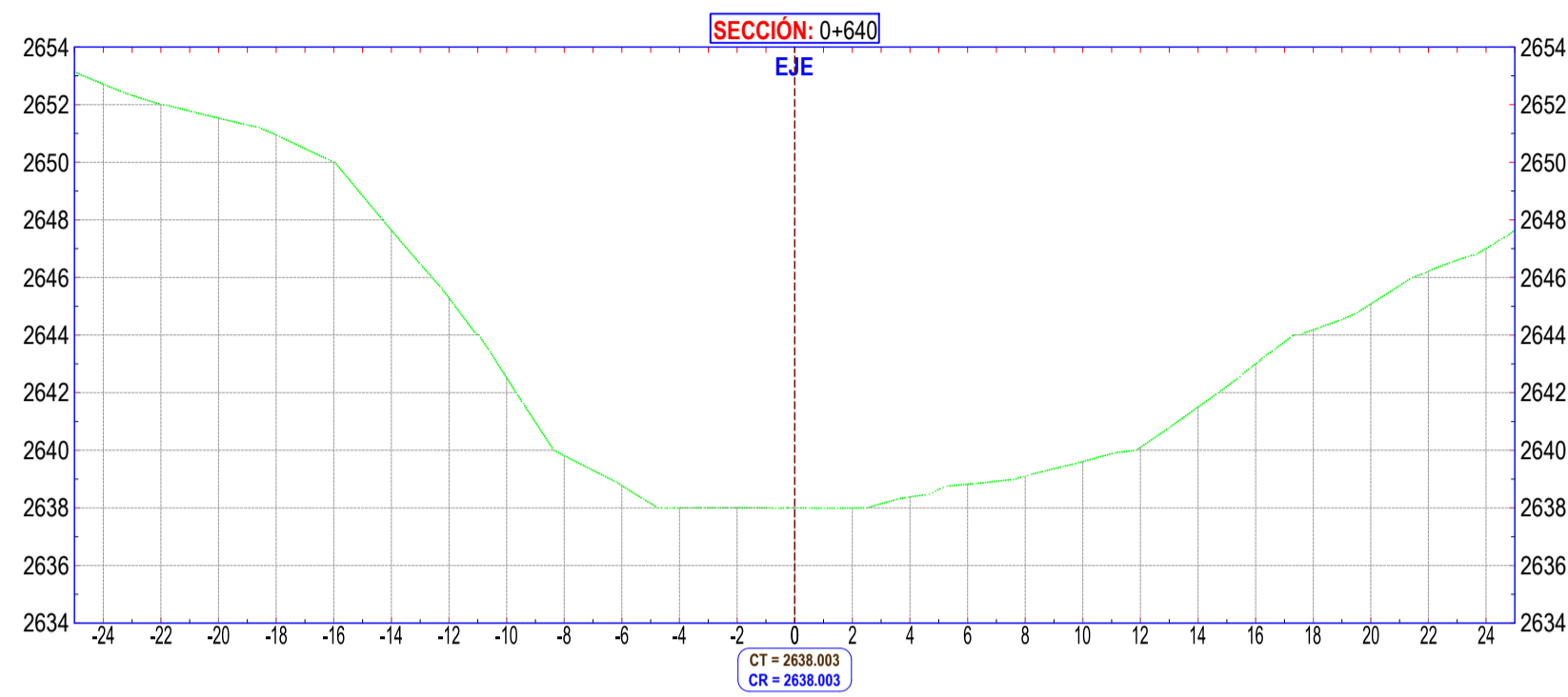
**ST-01**



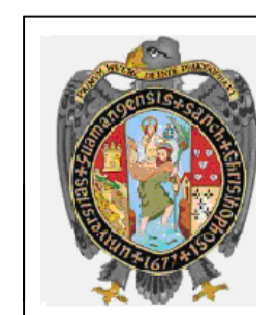
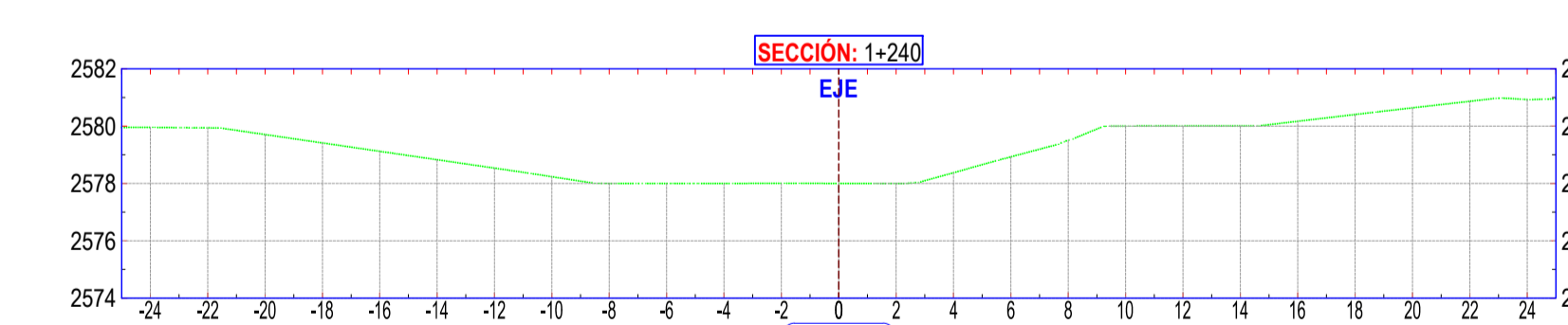
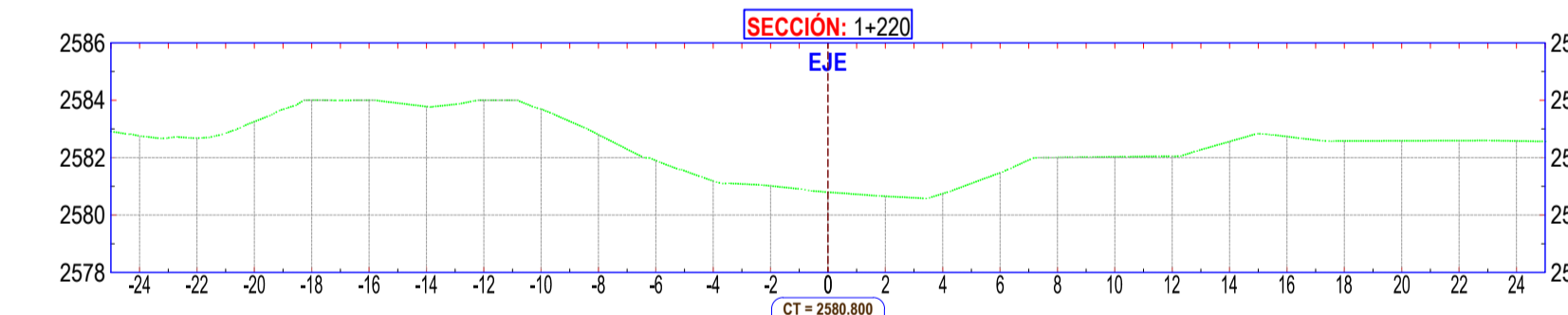
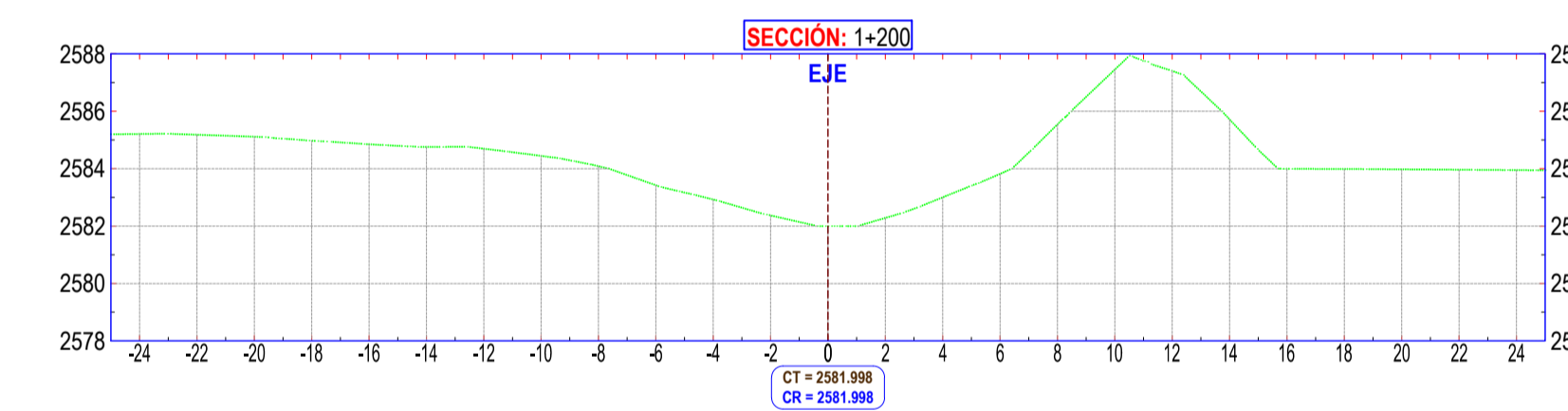
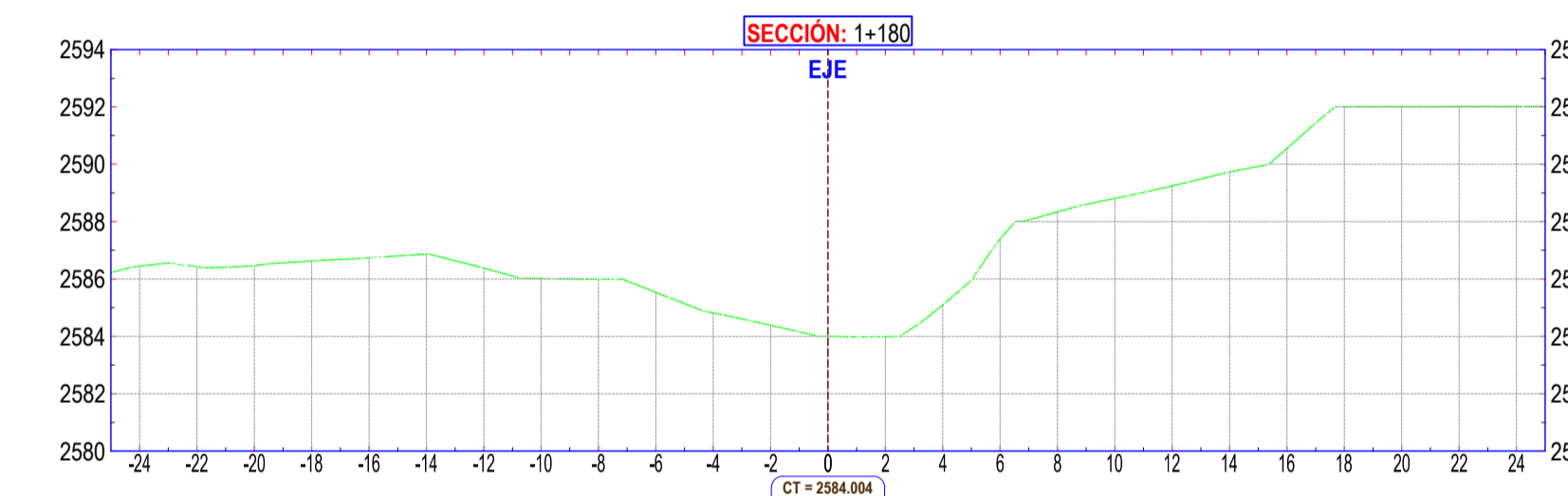
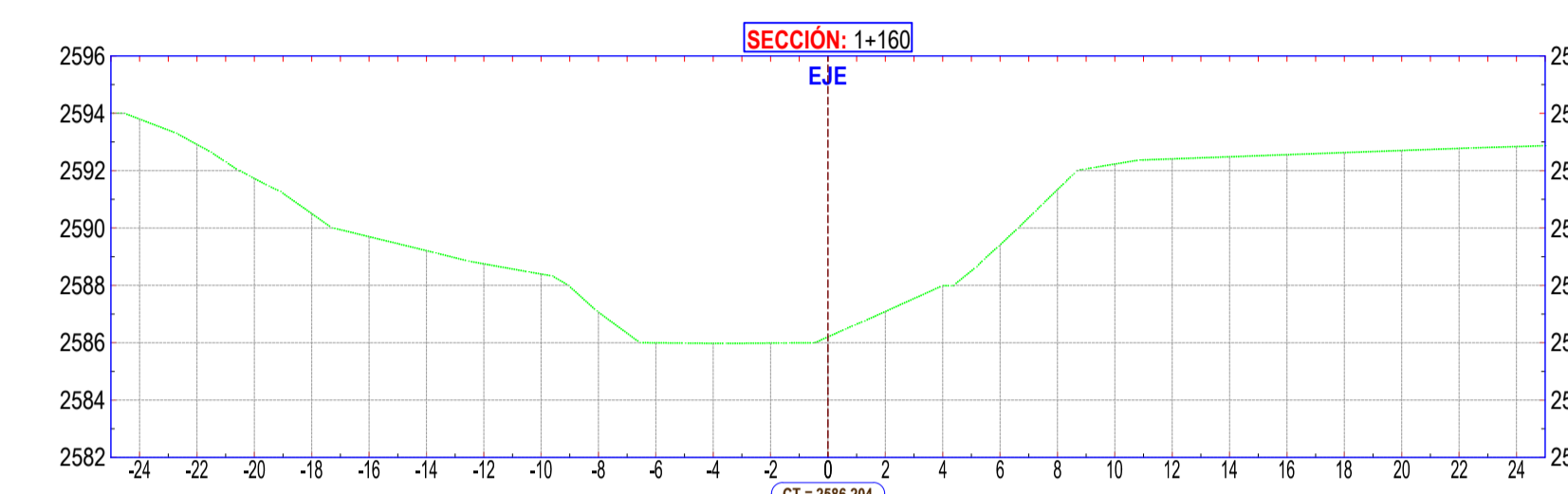
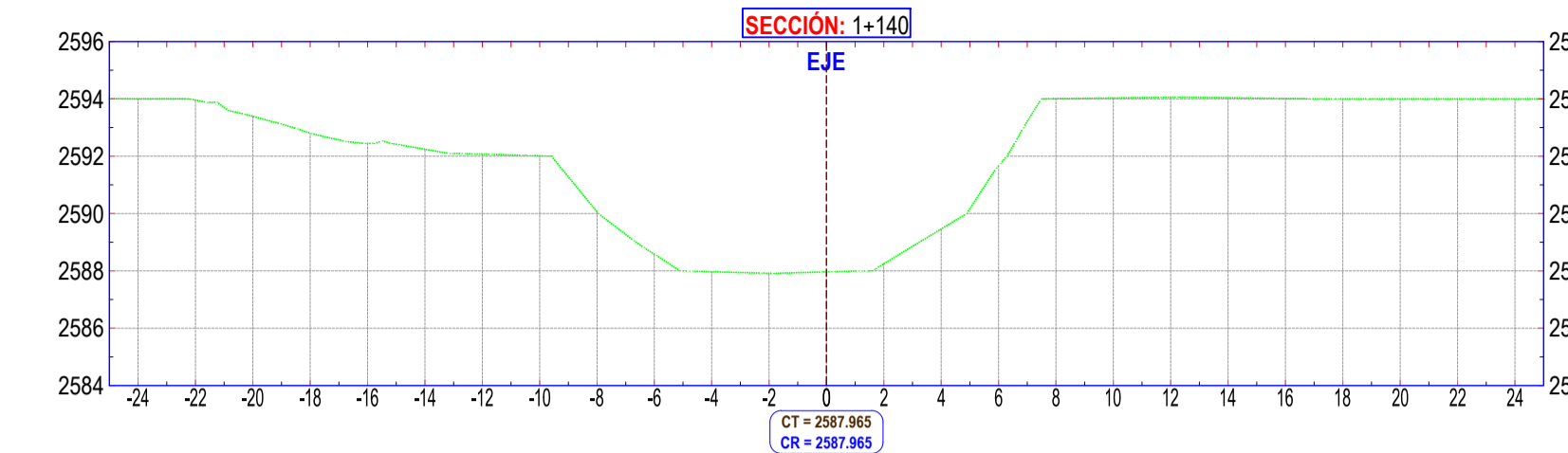
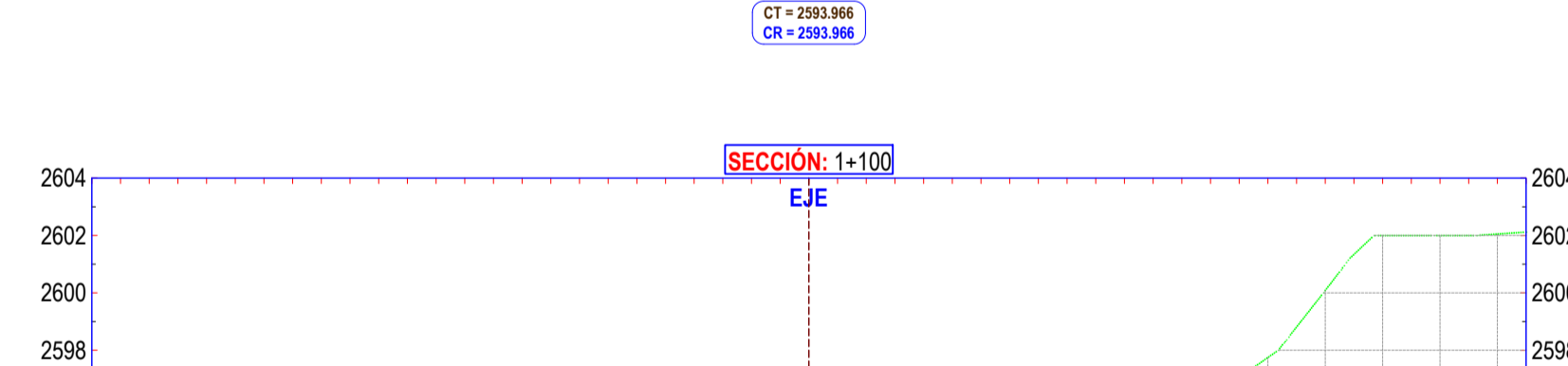
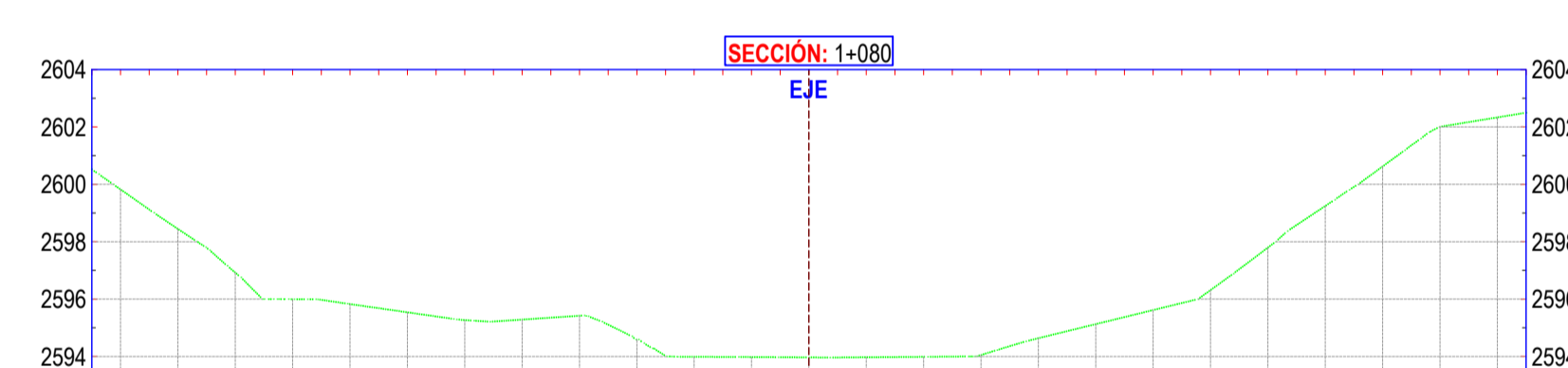
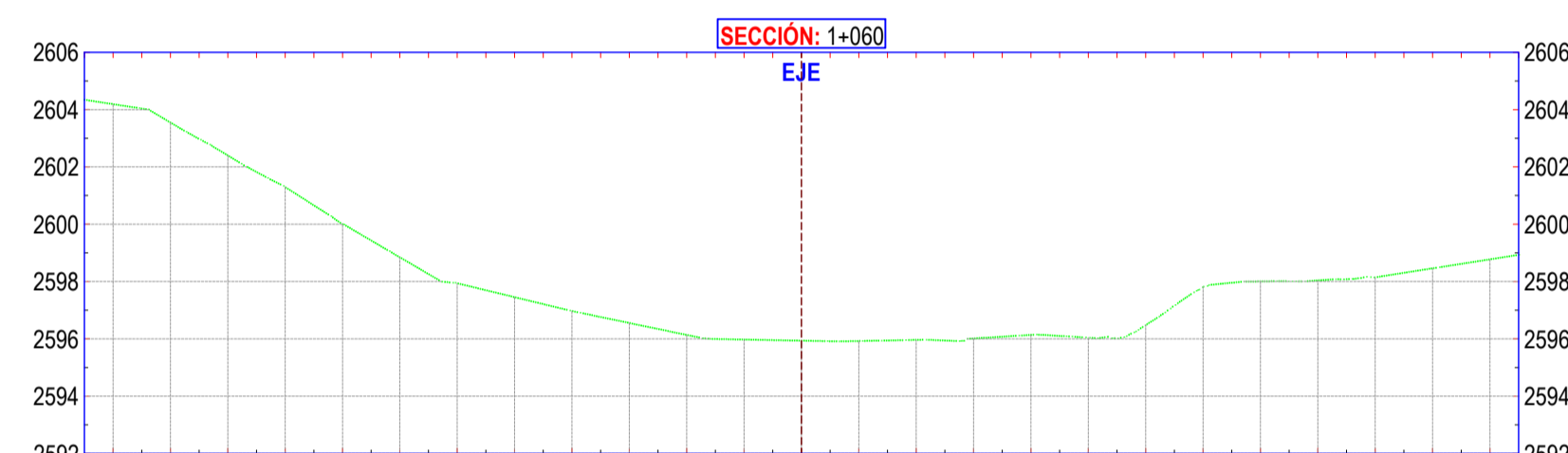
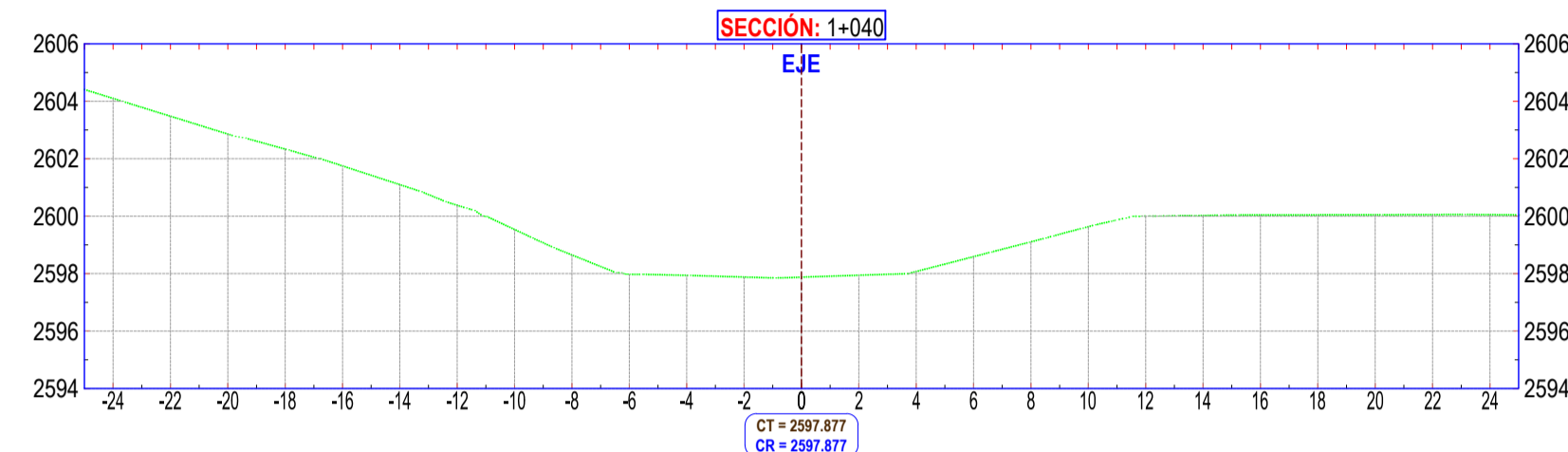
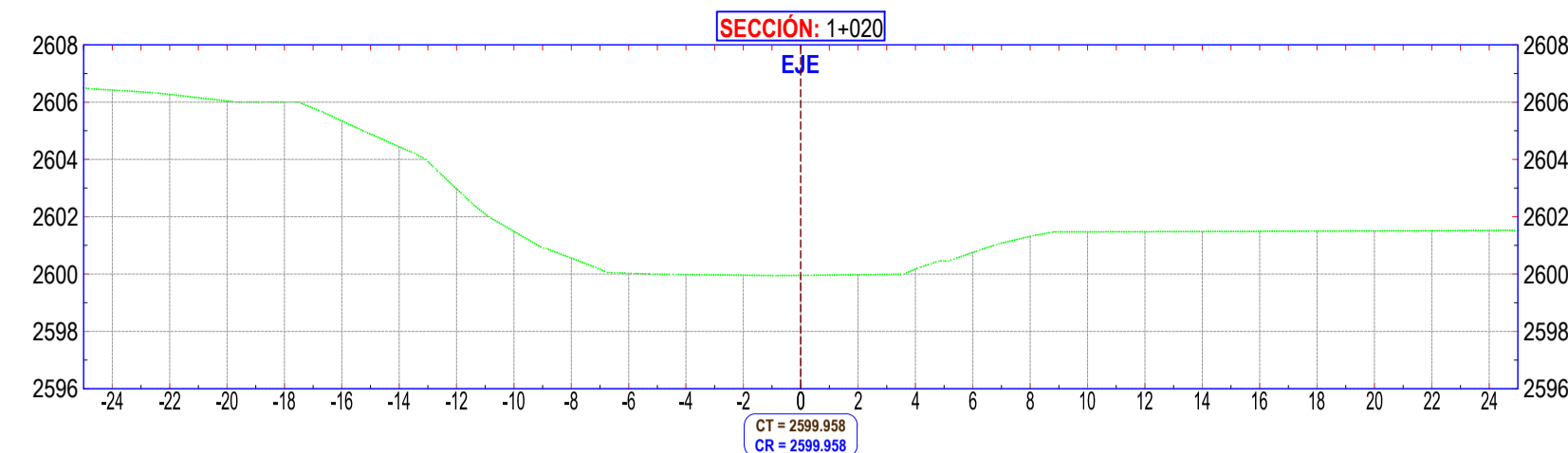
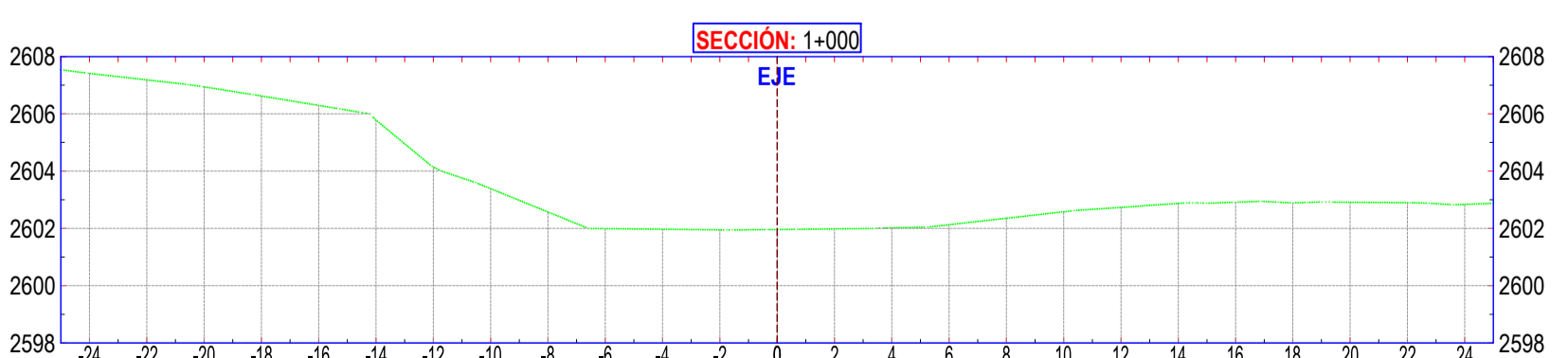
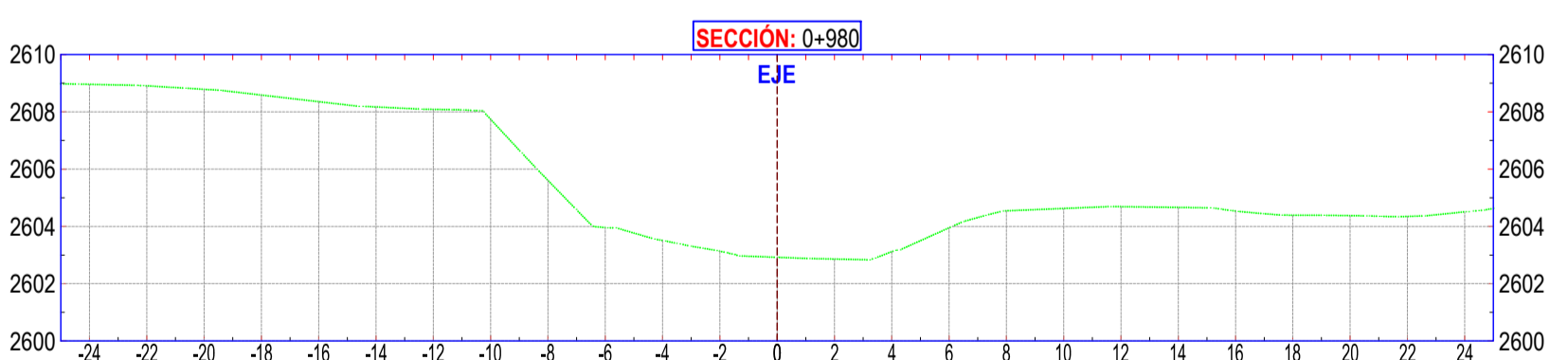
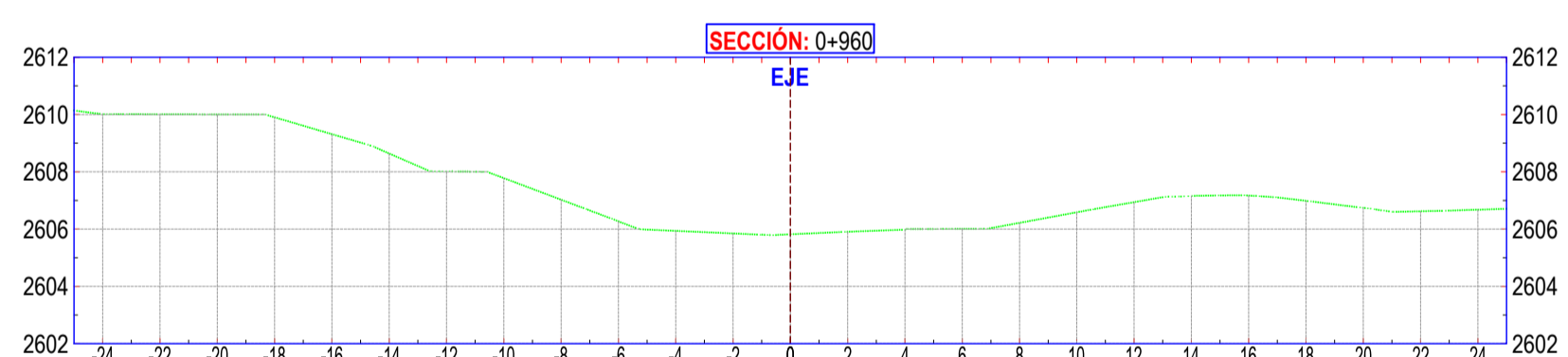
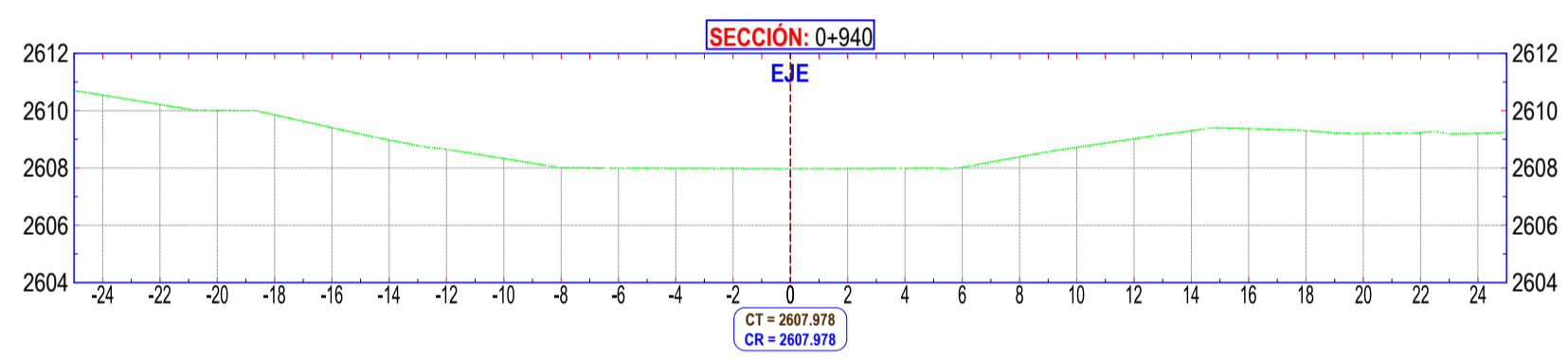
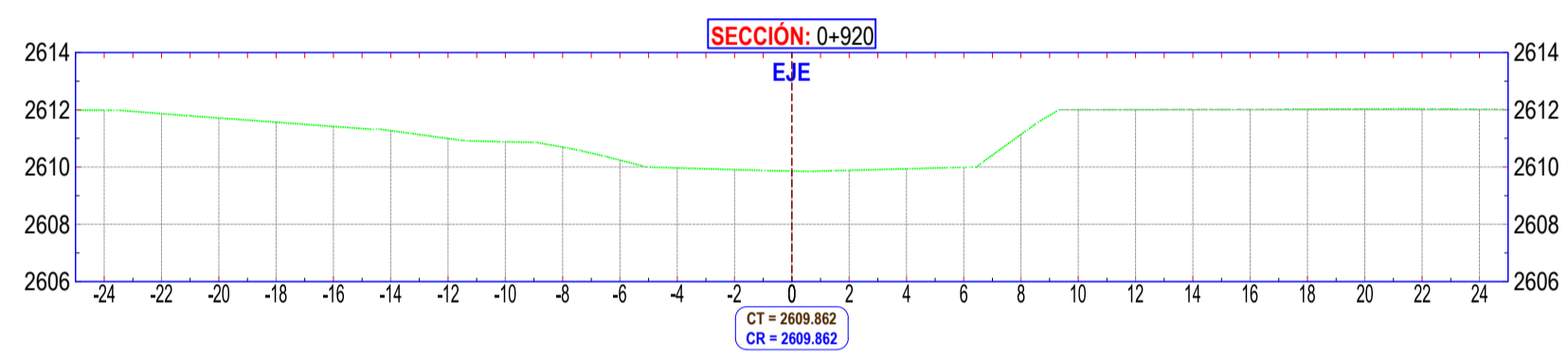
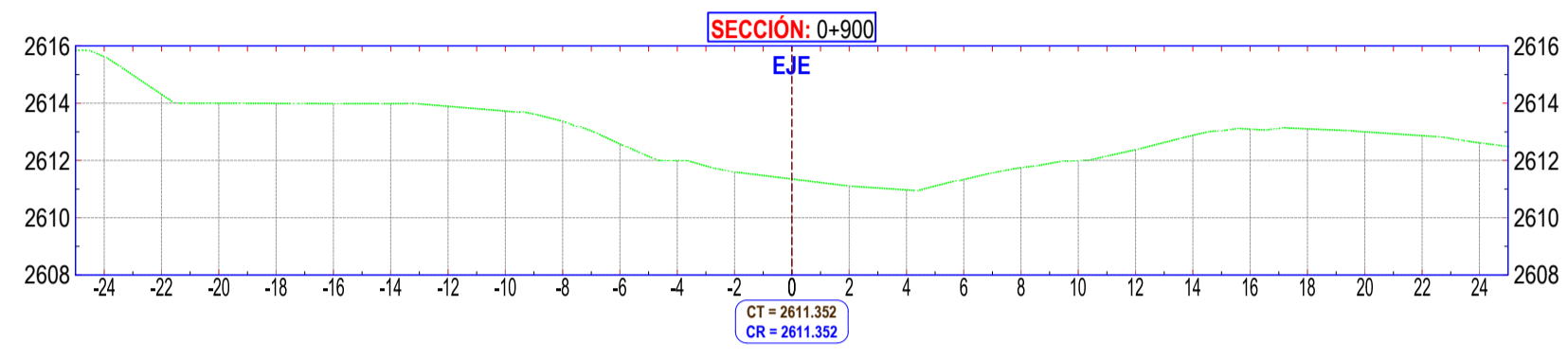
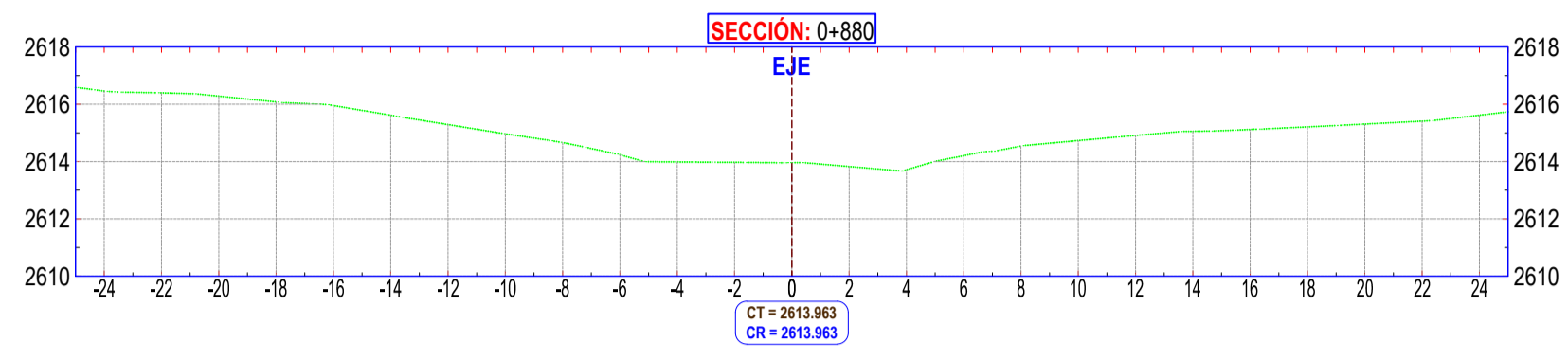
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA</b> <b>I.P. INGENIERÍA AGRÍCOLA</b>		
	<b>TESIS:</b> "Modelación hidrológica y hidráulica del río Ucumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel - La Mar, 2024"		
<b>UBICACIÓN:</b> Lugar : Río Ucumayo Distrito : San Miguel Provincia : La Mar Departamento : Ayacucho		<b>PLANO: Plano Topográfico</b> Secciones transversales-Río Ucumayo- Prog. 0+280km @ 0+444km	<b>LAMINA:</b> <b>ST-02</b>
		<b>TESISTA: Ruth Lujan Gutiérrez</b>	
		<b>FECHA: febrero-2025</b>	<b>ESCALA: indicado</b>



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA</b> <b>I.P. INGENIERÍA AGRÍCOLA</b>		
	<b>TESIS:</b> "Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel - La Mar, 2024"		
<b>UBICACIÓN:</b> Lugar : Río Ucumayo Distrito : San Miguel Provincia : La Mar Departamento : Ayacucho		<b>PLANO: Plano Topográfico</b> Secciones transversales-Río Ucumayo- Prog. 0+460km @ 0+620km	<b>LAMINA:</b> <b>ST-03</b>
<b>FECHA: febrero-2025</b>		<b>TESISTA: Ruth Lujan Gutiérrez</b>	<b>ESCALA:</b>



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA</b> <b>I.P. INGENIERÍA AGRÍCOLA</b>		
	<b>TESIS:</b> "Modelación hidrológica y hidráulica del río Ucumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel - La Mar, 2024"		
<b>UBICACIÓN:</b> Lugar : Río Ucumayo Distrito : San Miguel Provincia : La Mar Departamento : Ayacucho		<b>PLANO:</b> Plano Topográfico Secciones transversales-Río Ucumayo- Prog. 0+640km @ 0+860km	<b>LAMINA:</b> <b>ST-04</b>
<b>FECHA:</b> febrero-2025		<b>TESISTA:</b> Ruth Lujan Gutiérrez	<b>ESCALA:</b>



**UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA**  
**I.P. INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**TESIS:**  
"Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel - La Mar, 2024"

**UBICACIÓN:**  
Lugar : Río Ucumayo  
Distrito : San Miguel  
Provincia : La Mar  
Departamento : Ayacucho

**PLANO:** Plano Topográfico  
Secciones transversales-Río Ucumayo- Prog. 0+880km @ 1+240km

**TESISTA:** Ruth Lujan Gutiérrez

**FECHA:** febrero-2025

**ESCALA:**



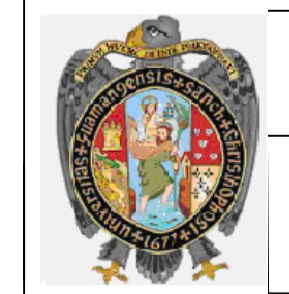
**LAMINA:**  
**ST-05**



LEYENDA	
SIMBOLO	DESCRIPCION
BMs	ROTULADO
P.G.	MONUMENTADO
	ALINEAMIENTO DEL CANAL

NO.	E	N	ALTIMETRIA	DESCRIPCION
1001282	610371.469	8560117.084	2694.082	1001282. monumentado con placa geodésica, según requeridos del IGN
1001283	610940.697	8560843.654	2634.08	1001283. monumentado con placa geodésica, según requeridos del IGN

NO.	E	N	ALTIMETRIA	DESCRIPCION
BM1	610358.417	8560819.852	2691.712	MARCADO CON ESMALTE SOBRE UN PUNTO FIJO
BM2	610770.039	8561054.762	2627.255	MARCADO CON ESMALTE SOBRE UN PUNTO FIJO
BM3	611064.014	8560943.499	2594.705	MARCADO CON ESMALTE SOBRE UN PUNTO FIJO



**UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA**  
I.P. INGENIERÍA AGRÍCOLA



**TESIS:**  
"Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel - La Mar, 2024"

**UBICACIÓN:**  
Lugar : Río Ucumayo  
Distrito : San Miguel  
Provincia : La Mar  
Departamento : Ayacucho

**PLANO:** Plano fotogramétrico del río Ucumayo  
Río Ucumayo- Prog. 0+000km @ 1+140km

**TESISTA:** Ruth Lujan Gutierrez

**FECHA:** febrero-2025

**ESCALA:**

**LAMINA:**  
**FT-01**



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**  
**Bach. RUTH LUJAN GUTIERREZ**  
**R.D. N° 237-2025-UNSCH-FCA-D**

En la ciudad de Ayacucho a los ocho días del mes de setiembre del año dos mil veinticinco, siendo las dieciocho horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por el M.Sc. Federico Quicaño Suárez, Mtro. Richard Alex Oscco Peceros como asesor, Ph.D. Sandra del Aguila Rios y el Ing. Efraín Chuchón Prado; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel - La Mar, 2024**, para obtener el Título Profesional de Ingeniera Agrícola, presentado por la Bachiller **RUTH LUJAN GUTIERREZ**.

El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invito a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberacion y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
M.Sc. Federico Quicaño Suárez	16	15	15	15
Mtro. Richard Alex Oscco Peceros	16	16	16	16
Ph.D. Sandra del Aguila Rios	15	14	14	14
Ing. Efraín Chuchón Prado	15	15	15	15
<b>PROMEDIO GENERAL</b>				<b>15</b>

Acto seguido se invita a la sustentante y público en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.

  
 .....  
**M.Sc. Federico Quicaño Suárez**  
 Presidente

  
 .....  
**Mtro. Richard Alex Oscco Peceros**  
 Asesor

  
 .....  
**Ph.D. Sandra del Aguila Rios**  
 Jurado

  
 .....  
**Ing. Efraín Chuchón Prado**  
 Jurado

  
 .....  
**Mtro. Rodolfo Alca Mendoza**  
 Secretario Docente



**UNSCH**

FACULTAD DE CIENCIAS  
**AGRARIAS**

## CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativizar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por R.D. N° 226-2025-UNSCH-FCA-D, de fecha 19 de agosto de 2025; hace constar que el trabajo titulado;

### **Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucusmayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel – La Mar, 2024**

Autor : Ruth Lujan Gutierrez

Asesor : Richard Alex Oscco Peceros

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de Tesis, aprobado mediante la RCU N° 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de siete por ciento (**7 %**) de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajos estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

**Nota:** Se adjunta el resultado con Identificador de la entrega: 2770353204

Ayacucho, 03 de octubre de 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE  
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA  
Facultad de Ciencias Agrarias

Ing. Edgar Fenorio Mancilla  
Coordinador de Control de originalidad de  
trabajo de Investigación y tesis - FCA

# Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucusmayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel – La Mar, 2024

*por* Ruth Lujan Gutierrez

---

**Fecha de entrega:** 03-oct-2025 09:33p. m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2770353204

**Nombre del archivo:** TESIS\_OK\_COMPLETO\_Sandra.pdf (33.16M)

**Total de palabras:** 44569

**Total de caracteres:** 213837

# Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel – La Mar, 2024

## INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>7</b> %	<b>7</b> %	<b>3</b> %	<b>1</b> %
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>1</b> %
<b>2</b>	<b>repositorio.unheval.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1</b> %
<b>3</b>	<b>repositorio.udh.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1</b> %
<b>4</b>	<b>es.scribd.com</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>5</b>	<b>repositorio.lamolina.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>6</b>	<b>repositorio.ug.edu.ec</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>7</b>	<b>dspace.ucuenca.edu.ec</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>8</b>	<b>es.slideshare.net</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>9</b>	<b>repositorio.ana.gob.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>10</b>	<b>repositorio.ucss.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>11</b>	<b>repositorio.urp.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>12</b>	<b>www.coursehero.com</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>13</b>	<b>dspace.ucacue.edu.ec</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>14</b>	<b>qdoc.tips</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %

15	<a href="http://repositorio.unasam.edu.pe">repositorio.unasam.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
16	<a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> Fuente de Internet	<1 %
17	<a href="http://alicia.concytec.gob.pe">alicia.concytec.gob.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
18	<a href="http://cdn.www.gob.pe">cdn.www.gob.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
19	<a href="http://www.mef.gob.pe">www.mef.gob.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
20	<a href="http://bibdigital.epn.edu.ec">bibdigital.epn.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
21	<a href="http://dspace.ups.edu.ec">dspace.ups.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
22	<a href="http://repositorio.unsaac.edu.pe">repositorio.unsaac.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
23	<a href="http://repositorio.unjbg.edu.pe">repositorio.unjbg.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
24	Submitted to Universidad Andina del Cusco Trabajo del estudiante	<1 %
25	<a href="http://core.ac.uk">core.ac.uk</a> Fuente de Internet	<1 %
26	Submitted to Universidad de Guayaquil Trabajo del estudiante	<1 %
27	<a href="http://repositorio.upla.edu.pe">repositorio.upla.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
28	<a href="http://repositorio.unap.edu.pe">repositorio.unap.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
29	<a href="http://archive.org">archive.org</a> Fuente de Internet	<1 %
30	<a href="http://repositorio.unjfsc.edu.pe">repositorio.unjfsc.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
31	Submitted to Universitat Politècnica de València Trabajo del estudiante	<1 %

[cybertesis.unmsm.edu.pe](http://cybertesis.unmsm.edu.pe)

---

Excluir citas      Activo  
Excluir bibliografía      Activo

Excluir coincidencias      < 30 words

# Modelación hidrológica e hidráulica del río Ucumayo para identificación de zonas vulnerables a inundaciones en la localidad de San Miguel - La Mar, 2024

Ruth Lujan Gutierrez<sup>1</sup>  
Richard Alex Oscco Peceros<sup>1</sup>

Área de investigación: Hidrología Aplicada a la Gestión de Riesgos  
Línea de Investigación: Modelación hidrológica e hidráulica para la gestión del riesgo de inundaciones  
ruth.lujan.21@unsch.edu.pe  
richard.oscco@unsch.edu.pe

1. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Facultad de Ciencias Agrarias. Av. Independencia s/n.

## RESUMEN

En la localidad de San Miguel, provincia de La Mar (Ayacucho), la recurrencia de lluvias intensas incrementa el riesgo de inundaciones en los sectores colindantes al río Ucumayo, afectando viviendas, instituciones públicas y áreas agrícolas. El objetivo de la investigación fue identificar las zonas vulnerables a inundaciones mediante modelación hidrológica e hidráulica en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucumayo. Se aplicó un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y nivel explicativo, utilizando HEC-HMS para la simulación de caudales máximos y HEC-RAS para el análisis hidráulico del cauce. El estudio se sustentó en series pluviométricas corregidas con curva de doble masa, curvas IDF, hietogramas construidos con el método de bloques alternos y modelos digitales de elevación. Los resultados muestran caudales pico de hasta 55.0 m<sup>3</sup>/s para un periodo de retorno de 500 años, con profundidades de inundación superiores a 1.8 m; mientras que para un periodo de 70 años se obtuvo un caudal de 34.6 m<sup>3</sup>/s, generando un área inundada de 114,890 m<sup>2</sup> que compromete viviendas, áreas agrícolas e infraestructura pública. En conclusión, la modelación permitió delimitar con precisión las zonas expuestas y aportar información clave para la gestión del riesgo, resaltando la necesidad de implementar defensas ribereñas y medidas de prevención.

**Palabras clave:** Modelación hidrológica, HEC-HMS, HEC-RAS, caudales máximos, vulnerabilidad, gestión del riesgo.

## ABSTRACT

In the locality of San Miguel, province of La Mar (Ayacucho), the recurrence of intense rainfall increases the risk of flooding in areas adjacent to the Ucumayo River, affecting households, public institutions, and agricultural lands. The objective of this research was to identify flood-prone zones through hydrological and hydraulic modeling in the river stretch between Canalpata neighborhood and the Ucumayo bridge. A quantitative, applied, and explanatory-level approach was implemented, using HEC-HMS for peak discharge simulation and HEC-RAS for hydraulic analysis of the channel. The study was based on rainfall series corrected with the double mass curve, IDF curves, hyetographs constructed by the alternating block method, and digital elevation models. Results showed peak discharges up to 55.0 m<sup>3</sup>/s for a 500-year return period, with flood depths greater than 1.8 m; whereas for a 70-year return period, the discharge reached 34.6 m<sup>3</sup>/s, generating an inundated area of 114,890 m<sup>2</sup> that compromised households, croplands, and public infrastructure. In

conclusion, the modeling approach allowed a precise delineation of exposed areas and provided key information for risk management, highlighting the urgent need to implement riverbank defenses and preventive measures.

**Keywords:** Hydrological modeling, HEC-HMS, HEC-RAS, peak discharges, vulnerability, risk management.

## INTRODUCCIÓN

Los cambios climáticos a nivel mundial, especialmente el calentamiento global, han ocasionado un incremento sostenido de la temperatura en la superficie terrestre y la atmósfera. Este fenómeno, asociado a la acumulación de gases de efecto invernadero, modifica el ciclo hidrológico y genera precipitaciones más intensas y frecuentes (IPCC, 2021). Como consecuencia, los caudales de los ríos tienden a incrementarse, ocasionando crecidas, desbordes e inundaciones que afectan de manera recurrente a comunidades asentadas en zonas aledañas.

En el Perú, las inundaciones representan uno de los desastres naturales más frecuentes y con mayores impactos socioeconómicos. Entre 2003 y 2023, alrededor del 40 % de emergencias registradas se originaron por este fenómeno, afectando principalmente la costa norte y la sierra sur (CENEPRED, 2023). Eventos como el Fenómeno El Niño Costero 2017 evidenciaron la alta vulnerabilidad de la infraestructura y de los sistemas productivos frente a lluvias extremas. A nivel regional, Ayacucho presenta condiciones topográficas y climáticas que favorecen la ocurrencia de avenidas súbitas y procesos de erosión (ANA, 2022).

En la provincia de La Mar, diversos centros poblados han sufrido daños recurrentes en viviendas, infraestructura vial, instituciones educativas y áreas agrícolas debido a desbordes de ríos. En particular, la localidad de San Miguel enfrenta un riesgo creciente por el comportamiento del río Ucumayo. Durante la temporada de lluvias, en el tramo comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucumayo (1.14 km de longitud), se producen crecidas que generan inundaciones, erosión y acumulación de sedimentos, con pérdidas materiales y productivas significativas (Medina y Blas, 2021; AgroPerú, 2025).

A pesar de la magnitud del problema, en San Miguel no se han desarrollado estudios específicos sobre la vulnerabilidad a inundaciones en el río Ucumayo. Esta carencia limita la capacidad de autoridades y pobladores para implementar medidas preventivas y proyectos de mitigación. Por ello, surge la necesidad de desarrollar un análisis técnico que permita caracterizar las condiciones hidrológicas e hidráulicas de la cuenca y del tramo en riesgo.

En este marco, la presente investigación tiene como propósito realizar la regionalización hidrológica de la cuenca del río Ucumayo para caracterizar su régimen pluviométrico, estimar los caudales máximos mediante el modelado hidrológico con HEC-HMS e identificar las zonas vulnerables a inundaciones en el tramo Canalpata–puente Ucumayo a través del programa HEC-RAS. Con esta metodología se busca aportar una base científica y técnica que sustente la formulación de proyectos de infraestructura, planes de ordenamiento territorial y estrategias de gestión del riesgo en la provincia de La Mar.

## METODOLOGÍA

### Lugar de ejecución

El estudio se realizó en el tramo del río Ucumayo, comprendido entre el barrio Canalpata y el puente Ucumayo, con una longitud aproximada de 1.14 km. El área de investigación se localiza en la localidad de San Miguel, distrito de San Miguel, provincia de La Mar y departamento de Ayacucho. El sector presenta topografía accidentada, altitudes que oscilan entre 2,600 y 2,800 m s.n.m., y precipitaciones concentradas entre diciembre y marzo. El tramo estudiado presenta suelos de origen coluvial y aluvial, susceptibles a erosión y sedimentación durante la temporada de lluvias. Las coordenadas de referencia corresponden a 18 L 582,340 m E y 8,565,780 m S (UTM – WGS 84).

### Recolección y procesamiento de datos

Se recopilieron series históricas de precipitación de estaciones del SENAMHI, las cuales fueron corregidas mediante el método de la curva de doble masa. Posteriormente, se elaboraron las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) y se construyeron hietogramas aplicando el método de bloques alternos. Asimismo, se emplearon Modelos Digitales de Elevación (DEM) descargados de LandViewer y complementados con levantamientos topográficos mediante estación total, GPS diferencial y dron Autel EVO II.

### Modelación hidrológica

La simulación hidrológica se realizó en el software HEC-HMS, empleando el método de transformación de precipitación-escorrentía del Número de Curva (CN – SCS) y el método de pérdidas del SCS Curve Number. Los hidrogramas generados permitieron estimar caudales máximos para diferentes periodos de retorno (10, 25, 50, 70, 100 y 500 años).

### Modelación hidráulica

El análisis hidráulico del cauce se llevó a cabo en HEC-RAS 6.0, mediante un modelo unidimensional (1D). La geometría del río fue construida a partir del DEM y secciones transversales levantadas en campo. Se aplicaron condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo, obteniéndose los perfiles de flujo y mapas de inundación asociados a los caudales de diseño.

### Validación y análisis

Los resultados de la modelación fueron contrastados con registros históricos de crecidas y observaciones de campo realizadas en la zona. Finalmente, se elaboraron mapas de áreas inundables y profundidades de flujo, los cuales fueron procesados en ArcGIS y QGIS, permitiendo identificar con precisión las zonas vulnerables en la localidad de San Miguel.

### Materiales, equipos y software

Para el desarrollo de la investigación se emplearon los siguientes recursos:

#### Materiales y técnicas

- ❖ Datos topográficos y series históricas de precipitación.
- ❖ Levantamiento topográfico de campo.
- ❖ Mapas temáticos elaborados en **Google Earth** y **ArcGIS**.
- ❖ Modelos Digitales de Elevación (DEM, 12 m) descargados de **Land Viewer**.
- ❖ Cartografía oficial como el **mapa de suelos (escala 1:40 000)** de la **ZEE – MINAM**.

#### Equipos utilizados.

- ❖ **Estación total:** levantamiento topográfico de precisión.

- ❖ **GPS diferencial:** georreferenciación y control de puntos.
- ❖ **Dron Autel EVO II:** captura de imágenes aéreas y generación de MDT.

#### Software especializado

- ❖ **Google Earth:** visualización y digitalización de información geográfica.
- ❖ **ArcGIS y QGIS:** procesamiento de datos espaciales y mapas temáticos.
- ❖ **Autodesk Civil 3D:** modelamiento y diseño topográfico.
- ❖ **Hydrognomon:** análisis de series temporales hidrológicas.
- ❖ **HEC-HMS:** simulación hidrológica lluvia–escorrentía.
- ❖ **HEC-RAS:** modelación hidráulica y análisis de inundaciones.

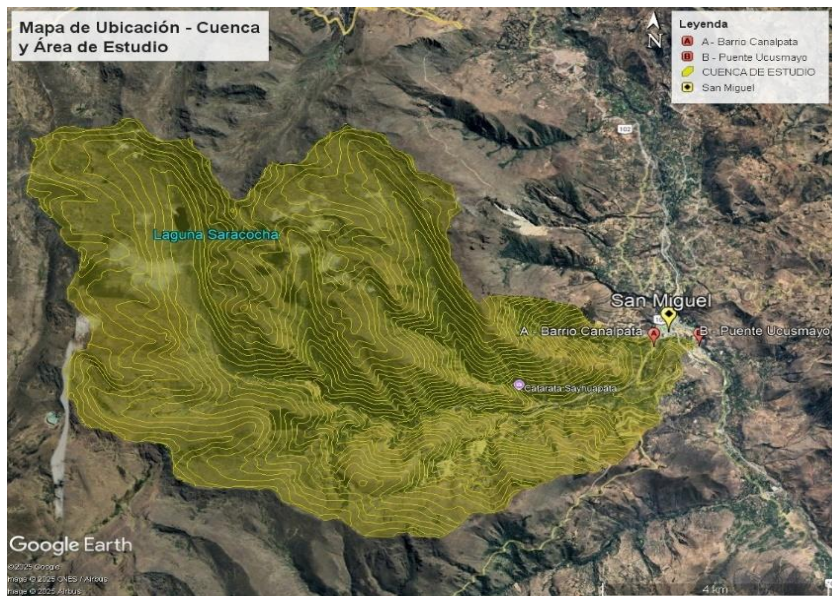
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Ubicación de la cuenca y área de estudio

La subcuenca del río Ucusmayo se ubica en el departamento de Ayacucho, provincia de La Mar, y desemboca en la localidad de San Miguel. Forma parte de la cuenca del Torobamba y presenta sectores vulnerables a inundaciones por su cercanía a infraestructura urbana y actividades socioeconómicas. El tramo analizado comprende entre el Barrio Canalpata (A) y el Puente Ucusmayo (B), tal como se muestra en las Figuras 01.

#### Figura 01

*Mapa de cuenca y área de estudio*



*Nota.* Se presenta la ubicación de la zona de estudio respecto a la subcuenca. Adaptado de Google Earth

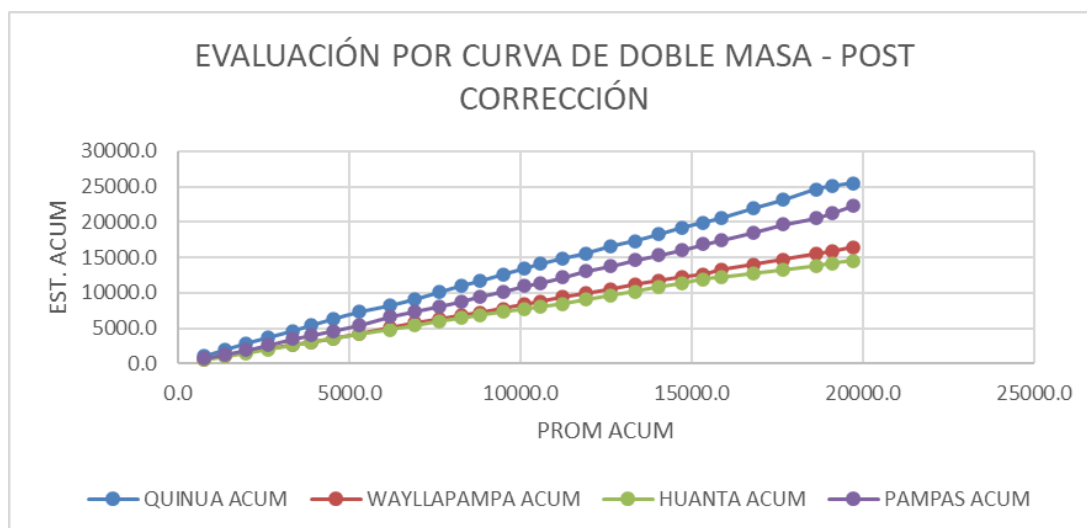
### Validación, complementación y corrección de datos pluviométricos

Para el análisis hidrológico se adoptó el periodo 1993–2021, por ser el intervalo con registros más completos en las cuatro estaciones. Se detectaron vacíos en 2016 en La Quinua y Wayllapampa, que se complementaron mediante curva de doble masas usando Pampas como estación base; los factores de complementación fueron 0.646 (La Quinua) y 1.296 (Wayllapampa). Posteriormente, la misma técnica permitió identificar y corregir inconsistencias frente a las estaciones guía Pampas y Huanta, aplicándose factores de corrección de 1.569 (La Quinua) y 0.770 (Wayllapampa). Con ello, las series quedaron homogeneizadas y validadas, constituyendo una base robusta para la modelación hidrológica

e hidráulica del río Ucumayo. La elección del método y el procedimiento de control de calidad se sustentan en textos y guías hidrológicas y de calidad de datos ampliamente aceptados (Chereque, 1991; Villón, 2004; Vélez, 2000; Gutiérrez, 2014; OMM, 2020), así como en los lineamientos nacionales y el uso operativo de la red pluviométrica (SENAMHI, 2021; ANA, 2022).

## Figura 02

*Evaluación por curva de doble masa - post corrección*



*Nota.* Evaluación final de tendencia de datos de cada estación luego de las correcciones aplicadas.

La evaluación final con la curva de doble masa evidencia que, tras la aplicación de los factores de corrección, las series de precipitación de las estaciones mantuvieron una **coherencia estadística** con la estación base, eliminando las inconsistencias iniciales. Esto asegura la **homogeneidad de los registros** y la confiabilidad de los insumos para la modelación hidrológica, en concordancia con los lineamientos de control de calidad de datos hidrometeorológicos (OMM, 2020; SENAMHI, 2021; Villón, 2004).

### Cálculo de promedios anuales

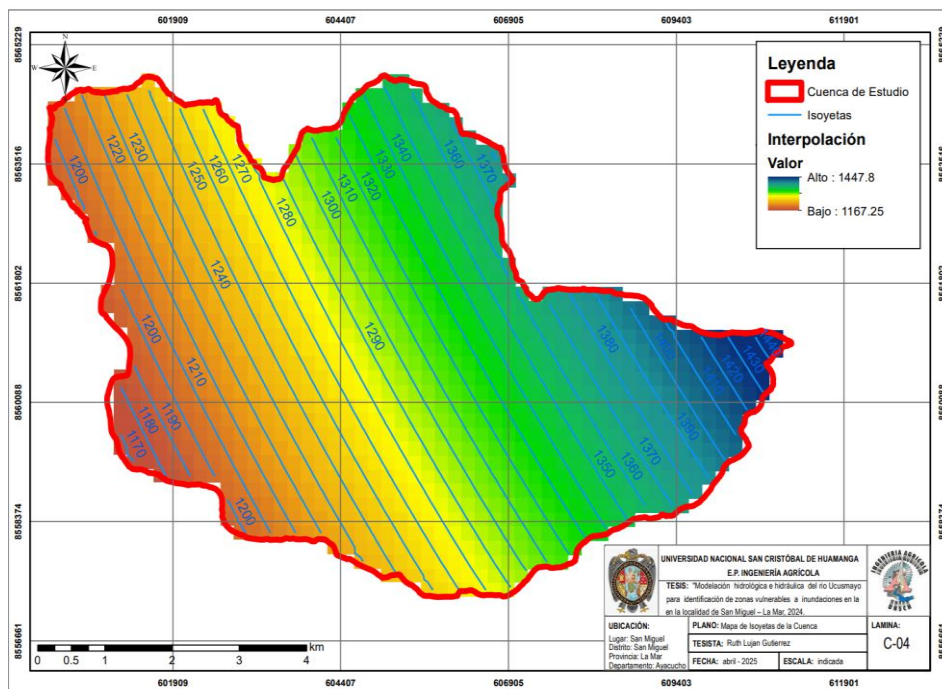
El cálculo de promedios anuales de precipitación (1993–2021), basado en series corregidas y validadas, permitió caracterizar con mayor confiabilidad el régimen pluviométrico de la cuenca del río Ucumayo. Los resultados evidenciaron una marcada variabilidad espacial, con valores promedio de 879.8 mm en La Quinua, 566.4 mm en Wayllapampa, 500.7 mm en Huanta y 769.6 mm en Pampas. En conjunto, estos datos muestran mayores precipitaciones en sectores altos y menores en áreas intermedias y bajas, patrón asociado a la influencia orográfica. Dichos valores constituyen insumos fundamentales para la regionalización pluviométrica, la elaboración de mapas de isoyetas y la parametrización del modelo hidrológico (SENAMHI, 2021; MINAM, 2019; CENEPRED, 2014; Flores, 2023).

### Interpolación espacial de la precipitación

A partir de los promedios anuales corregidos y validados de las cuatro estaciones, se realizó la regionalización de la precipitación en la cuenca del río Ucumayo mediante **interpolación espacial** en ArcGIS y la elaboración de **isoyetas** sobre el DEM y límites de cuenca preparados en QGIS. Esta combinación (DEM + isoyetas) es estándar para caracterizar gradientes pluviométricos en cuencas andinas y sustenta la estimación espacial continua a partir de puntos de medición (EOS Data Analytics, s. f.; Villón, 2004; Vélez, 2000).

Los resultados evidencian un patrón controlado por la **orografía**: las zonas altas, próximas a **La Quinua** y **Wayllapampa**, superan **1,200 mm/año**, mientras que los sectores medios y bajos, cercanos a **Huanta** y **Pampas**, se sitúan entre **700–900 mm/año**. Esta distribución espacial de la lluvia permitió identificar áreas de **mayor aporte de escorrentía** y sirvió de insumo directo para construir **hietogramas de diseño** y parametrizar el modelo hidrológico en **HEC-HMS**. El gradiente observado es consistente con los patrones orográficos reportados para la Sierra Sur y con la zonificación físico-geográfica regional (SENAMHI, 2021; MINAM, s. f.; CENEPRED, 2014).

**Figura 03**  
*Mapa de interpolación espacial de la precipitación*



*Nota.* Mapa de interpolación espacial de la precipitación en la zona, con fines de estimación de datos en la zona de la cuenca.

**Tabla 01**  
*Precipitaciones en la cuenca estimadas a partir de la regionalización*

PPMAX24HR		
37.30	32.40	37.90
36.70	23.00	31.20
35.20	32.70	22.30
29.70	21.10	28.20
37.80	33.20	31.70
43.60	24.60	36.70
28.40	46.80	33.00
26.70	28.50	21.60
28.70	32.10	35.50
27.00	28.70	23.40

*Nota.* Datos de precipitaciones máximas durante 24 horas utilizados para el modelamiento hidrológico, obtenidos de cada una de las regiones del mapa de interpolación espacial.

### **Modelado hidrológico – Caudales máximos (HEC–HMS)**

El modelado hidrológico permitió estimar los caudales máximos de avenida en la cuenca del río Ucumayo mediante el programa **HEC-HMS**, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, especializado en la simulación de procesos lluvia–escorrentía. Como insumo principal se emplearon **hietogramas de 24 horas** para periodos de retorno entre 5 y 500 años, generados a partir de curvas **IDF** ajustadas estadísticamente. Se integraron los parámetros morfométricos y edafológicos de la cuenca número de curva (CN), abstracción inicial (Ia), tiempo de concentración (Tc) y lag time, aplicando el método de pérdidas **SCS-CN** y el hidrograma unitario del **SCS** para la transformación de escorrentía. Este enfoque permitió simular de manera confiable la respuesta hidrológica de la cuenca frente a lluvias extremas, insumo esencial para la posterior modelación hidráulica (SENAMHI, 2021; MINAM, 2019; CENEPRED, 2014; Santillán, 2022).

### **Estimación de precipitaciones máximas**

El análisis estadístico de las precipitaciones máximas, desarrollado en Hydrognomon, permitió evaluar diferentes distribuciones de probabilidad (Normal, Log-Normal, Gamma, Pearson III, Log-Pearson III y Gumbel-EV1). Todas resultaron estadísticamente aceptables según la prueba de Kolmogórov–Smirnov; sin embargo, la distribución Gamma evidenció el mejor ajuste, alcanzando una significancia de 99.86 % y el menor valor de desviación (DMax = 0.06249). Este resultado respalda su empleo como modelo probabilístico para la estimación de lluvias extremas en la cuenca del río Ucumayo, coherente con aplicaciones previas en estudios hidrológicos de cuencas andinas (Vélez, 2000; Villón, 2004; SENAMHI, 2021).

**Tabla 02**

*Precipitaciones máximas de 24 h estimadas (Distribución Gamma)*

T (años)	P24h (mm)
5	36.33
10	39.49
20	42.23
25	43.05
50	45.45
70	46.56
100	47.69
150	48.94
200	49.80
250	50.45
500	52.43

*Nota.* Datos resultantes de extrapolación Gamma, aplicada a los datos iniciales de precipitaciones máximas durante 24 horas.

### **Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF)**

Las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) se elaboraron a partir de precipitaciones máximas ajustadas estadísticamente, desagregadas con el método empírico de Dick y Peschke en intervalos de 5 minutos a 24 horas. Los resultados mostraron intensidades que oscilaron entre 152.7 mm/h (Tr = 500 años, 5 min) y 0.42 mm/h (Tr = 5 años, 24 h), reflejando la fuerte variabilidad temporal de los eventos extremos en la cuenca del río Ucumayo. Mediante regresión múltiple se obtuvo la ecuación general de la curva IDF ( $R^2 = 0.99995$ ), considerada una herramienta confiable para diseñar hietogramas de tormenta e implementar simulaciones en HEC-HMS. Estos hallazgos son coherentes con patrones

observados en cuencas altoandinas y constituyen un insumo clave para la planificación hidrológica y la gestión del riesgo por inundaciones en San Miguel (SENAMHI, 2021; MINAM, 2019; CENEPRED, 2014; Vélez, 2000; Villón, 2004).

**Tabla 03**

*Coefficientes de precipitación para diferentes tiempos de retorno según el modelo de Dyck y Peschke*

Coeficiente de precipitación - Modelo Dyck y Peschke											
Duración	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 20 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 70 años	Tr = 100 años	Tr = 150 años	Tr = 200 años	Tr = 250 años	Tr = 500 años
60	0.41	0.43	0.45	0.46	0.48	0.49	0.50	0.52	0.53	0.53	0.56
120	0.43	0.46	0.48	0.49	0.51	0.52	0.54	0.55	0.56	0.57	0.60
180	0.47	0.49	0.52	0.52	0.55	0.56	0.58	0.59	0.61	0.61	0.65
240	0.51	0.53	0.56	0.57	0.60	0.61	0.63	0.64	0.66	0.67	0.70
300	0.56	0.58	0.61	0.62	0.65	0.67	0.69	0.70	0.72	0.73	0.77
360	0.62	0.65	0.68	0.69	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.81	0.85
420	0.70	0.73	0.77	0.78	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.91	0.96
480	0.80	0.84	0.88	0.90	0.94	0.97	0.99	1.02	1.04	1.05	1.11
540	0.96	1.01	1.06	1.07	1.13	1.15	1.18	1.22	1.24	1.26	1.32
600	1.21	1.27	1.33	1.35	1.42	1.46	1.49	1.54	1.57	1.59	1.67
660	1.70	1.79	1.88	1.91	2.00	2.05	2.10	2.16	2.20	2.24	2.35
720	3.29	3.45	3.62	3.68	3.86	3.95	4.05	4.17	4.25	4.32	4.53
780	17.37	18.23	19.13	19.43	20.39	20.88	21.40	22.02	22.46	22.81	23.94
840	2.20	2.31	2.43	2.46	2.59	2.65	2.72	2.79	2.85	2.89	3.04
900	1.41	1.48	1.55	1.58	1.65	1.69	1.74	1.79	1.82	1.85	1.94
960	1.07	1.12	1.18	1.19	1.25	1.28	1.32	1.35	1.38	1.40	1.47
1020	0.87	0.92	0.96	0.98	1.02	1.05	1.08	1.11	1.13	1.15	1.20
1080	0.74	0.78	0.82	0.83	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.03
1140	0.65	0.69	0.72	0.73	0.77	0.79	0.81	0.83	0.84	0.86	0.90
1200	0.58	0.61	0.64	0.65	0.69	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.81
1260	0.53	0.56	0.58	0.59	0.62	0.64	0.65	0.67	0.69	0.70	0.73
1320	0.49	0.51	0.54	0.54	0.57	0.59	0.60	0.62	0.63	0.64	0.67
1380	0.45	0.47	0.50	0.50	0.53	0.54	0.56	0.57	0.58	0.59	0.62
1440	0.42	0.44	0.46	0.47	0.49	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.58

*Nota.* La tabla presenta los coeficientes adimensionales de distribución de la precipitación estimados con el modelo de Dyck y Peschke, considerando distintos periodos de retorno.

### Parámetros de la cuenca para modelamiento

A partir del DEM procesado en QGIS se obtuvieron los principales indicadores morfométricos de la cuenca del río Ucusmayo. Con un área de 49.28 km<sup>2</sup>, relieve de 655 m y pendiente media de 28.7 %, se evidencia un terreno montañoso y de rápida escorrentía. El tiempo de concentración de 0.70 h y el Lag Time de 25.37 min confirman la alta susceptibilidad de la cuenca a crecidas súbitas, condición típica de cuencas pequeñas y de fuerte pendiente en la sierra sur del Perú. Estos resultados constituyen la base para la modelación hidrológica e hidráulica desarrollada en este estudio (MINAM, 2019; SENAMHI, 2021; CENEPRED, 2014; Flores, 2023).

### Número de Curva (CN).

El CN se determinó combinando tipo y uso de suelo mediante el método SCS-CN. De acuerdo con la cartografía edafológica del MINAM (2019), en la zona de estudio (San Miguel – La Mar, Ayacucho) predominan suelos Leptosoles y Regosoles del Grupo Hidrológico C, caracterizados por infiltración moderadamente baja, propios de condiciones climáticas subáridas. En cuanto a la cobertura, destacan herbazales (30 km<sup>2</sup>), arbustales (16 km<sup>2</sup>) y áreas agrícolas y otras coberturas (3.28 km<sup>2</sup>), con valores de CN de 74, 71 y 85, respectivamente (CENEPRED, 2014; Villón, 2004). El promedio ponderado resultó CN =

74, lo que evidencia capacidad limitada de infiltración y rápida generación de escorrentía superficial. La abstracción inicial fue  $I_a = 17.85$  mm, confirmando que tras un umbral reducido de lluvia la cuenca responde con caudales inmediatos, parámetro clave para la simulación en HEC-HMS (SENAMHI, 2021; Vélez, 2000).

### **Cálculo de caudal pico**

Con los insumos pluviométricos (curvas IDF y hietogramas de diseño) y los parámetros morfométricos de la cuenca ( $CN = 74$ ,  $I_a = 17.85$  mm,  $T_c$  y Lag Time = 25.37 min), se configuró el modelo hidrológico en HEC-HMS, software especializado en procesos hidrológicos y ampliamente aplicado en estudios hidrológicos e hidráulicos en el Perú (Flores, 2023; Medina & Blas, 2021; Santillán, 2022). Para la simulación se utilizó el método SCS-CN para las pérdidas, el hidrograma unitario SCS para la transformación de escorrentía y un intervalo temporal de 30 minutos en un ciclo de 12 horas.

La ejecución del modelo permitió generar hidrogramas de escorrentía y estimar los caudales pico de diseño para distintos periodos de retorno (Tabla 04). Los resultados muestran un incremento progresivo de los caudales máximos, desde  $16.2$  m<sup>3</sup>/s ( $Tr = 5$  años) hasta  $55.0$  m<sup>3</sup>/s ( $Tr = 500$  años), lo que evidencia la rápida respuesta de la cuenca ante lluvias intensas y su elevada vulnerabilidad hidrológica (CENEPRED, 2023; IPCC, 2021; SENAMHI, 2021).

**Tabla 04**

*Caudales máximos de diseño (m<sup>3</sup>/s)*

Tr = 5 años	16.2
Tr = 10 años	20.2
Tr = 20 años	24.7
Tr = 25 años	26.4
Tr = 50 años	31.8
Tr = 70 años	34.6
Tr = 100 años	37.9
Tr = 150 años	41.8
Tr = 200 años	44.7
Tr = 250 años	47.1
Tr = 500 años	55

*Nota.* Los valores corresponden a los caudales máximos simulados mediante el modelo hidrológico HEC-HMS para distintos periodos de retorno.

Los caudales pico simulados con HEC-HMS evidencian la rápida respuesta de la cuenca del río Ucumayo a lluvias intensas, alcanzando hasta  $55.0$  m<sup>3</sup>/s en eventos de 500 años. Estos resultados coinciden con estudios en cuencas andinas de características similares y constituyen una base clave para la gestión del riesgo y la planificación de medidas de protección (Flores, 2023; Medina & Blas, 2021; Santillán, 2022; CENEPRED, 2023; SENAMHI, 2021).

### **Identificación de zonas vulnerables (HEC-RAS)**

La identificación de áreas potencialmente inundables en San Miguel se desarrolló mediante un enfoque integral de modelación hidráulica. A partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) se generó un modelo TIN y, con apoyo de HEC-GeoRAS en ArcGIS, se digitalizaron

los elementos geométricos básicos del cauce (stream centerline, bank lines, flow paths y secciones transversales). Esta información fue exportada a HEC-RAS 6.0 para la simulación hidráulica unidimensional (Silvera & Mendoza, 2022).

Se incorporaron secciones transversales levantadas en campo en un tramo de 1.140 km (entre Canalpata y el puente Ucusmayo), procesadas en Civil 3D para garantizar mayor precisión en la geometría hidráulica. Los coeficientes de rugosidad de Manning se diferenciaron entre el cauce central ( $n = 0.04$ ) y las márgenes laterales ( $n = 0.027$ ), en concordancia con las características físicas observadas y criterios técnicos de calibración hidráulica (MINAM, s.f.; SENAMHI, 2021; Flores, 2023).

Los caudales máximos de entrada correspondieron a las simulaciones hidrológicas en HEC-HMS para periodos de retorno de 5, 70 y 500 años, complementados con la pendiente longitudinal del cauce (0.1318). Con estos insumos se ejecutaron las simulaciones hidráulicas en HEC-RAS, obteniéndose perfiles de lámina de agua, secciones transversales y mapas de inundación que permitieron delimitar la extensión de las áreas vulnerables, profundidades de anegamiento y distribución de velocidades de flujo. Estos resultados constituyen un insumo técnico esencial para la gestión del riesgo y la planificación de medidas de mitigación (CENEPRED, 2023; Santillán, 2022).

#### **Tabla 05**

*Posibles áreas de inundación entre Barrio Canalpata y puente Ucusmayo*

<b>Periodo de Retorno (TR)</b>	<b>Área Inundada (m<sup>2</sup>)</b>
5 años	98,967
70 años	114,890
500 años	227,189

*Nota.* Áreas de inundación en la zona de estudio

Los resultados de la simulación hidráulica muestran un incremento progresivo del área inundada en el tramo entre Canalpata y el puente Ucusmayo, pasando de 98,967 m<sup>2</sup> en un evento de 5 años a más de 227,000 m<sup>2</sup> en un evento extremo de 500 años. Este comportamiento confirma la elevada vulnerabilidad del sector ante lluvias intensas, asociado a la pendiente pronunciada del cauce y a la reducida capacidad de almacenamiento de la cuenca (SENAMHI, 2021; MINAM, s.f.).

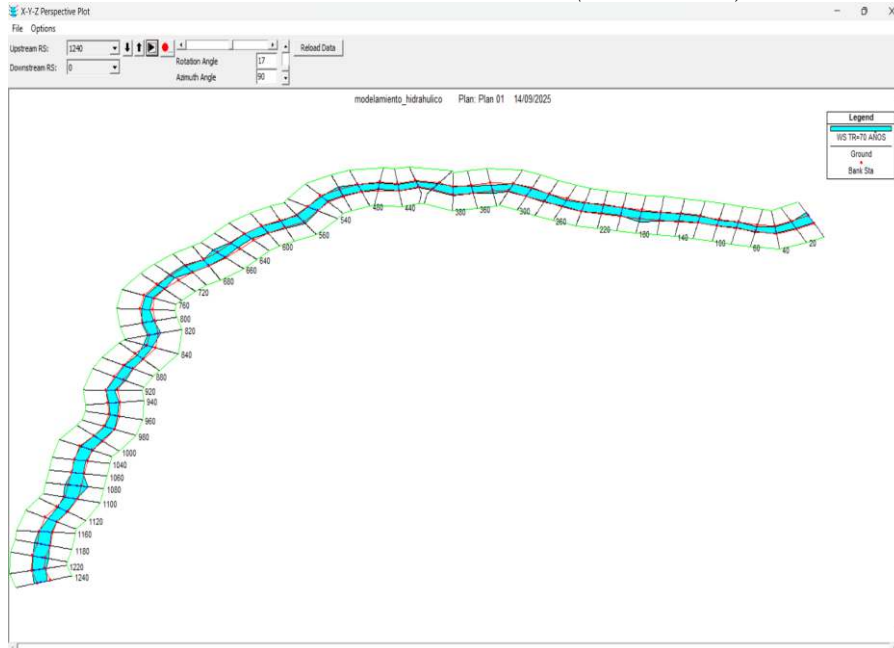
La expansión de las zonas anegadas en el escenario de 70 años (114,890 m<sup>2</sup>) evidencia la necesidad de considerar este periodo de retorno como crítico para el diseño de obras de encauzamiento y defensas ribereñas, en concordancia con lo planteado en estudios similares de gestión de riesgo en cuencas altoandinas (Flores, 2023; Santillán, 2022; Silvera & Mendoza, 2022). Asimismo, la magnitud del evento de 500 años refuerza la importancia de integrar escenarios extremos en la planificación territorial y en la zonificación urbana de San Miguel (CENEPRED, 2023; Autoridad Nacional del Agua, 2022).

A continuación, se presentan los resultados de la modelación hidráulica en HEC-RAS para el escenario de un periodo de retorno de 70 años. Las figuras muestran vistas en planta, perfil y secciones transversales, así como el mapa de zonas vulnerables a inundaciones en el área

de estudio, lo que permite interpretar la dinámica del flujo y la extensión de las áreas afectadas.

### Figura 04

Vista 1 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR-70 años)

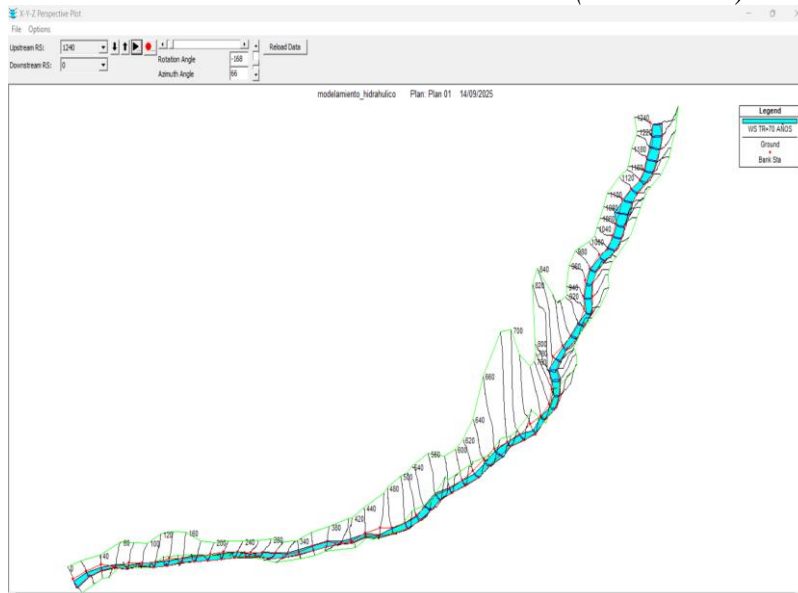


Nota. Vista en planta del modelamiento

La vista en planta permite apreciar la distribución espacial del flujo y la interacción con las márgenes, identificando sectores donde el río pierde capacidad de conducción.

### Figura 05

Vista 2 de modelado en X-Y-Z en HEC RAS (TR-70 años)

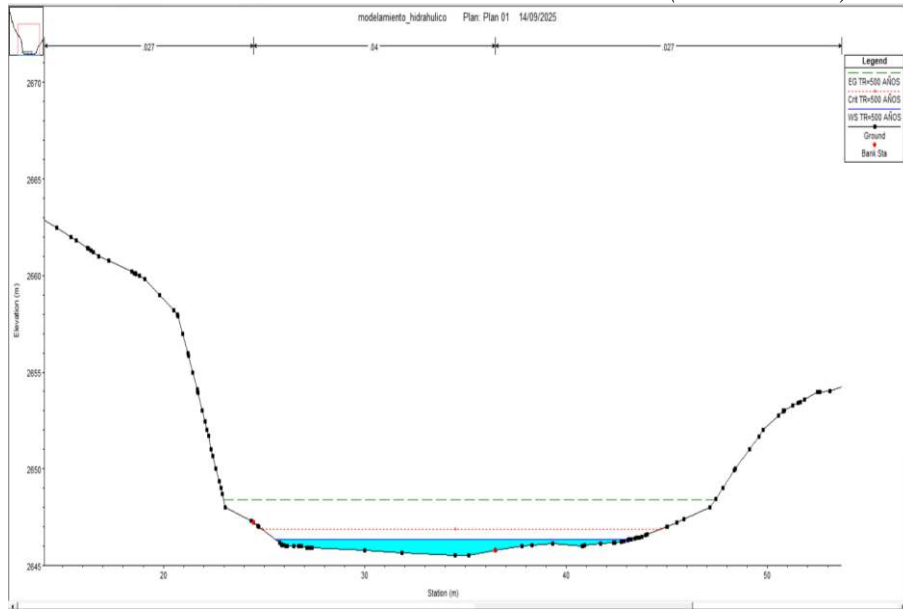


Nota. Vista de perfil del modelamiento

La vista longitudinal refleja la energía hidráulica y los gradientes de nivel, destacando el comportamiento del flujo en tramos de mayor pendiente.

**Figura 06**

*Sección transversal 2 de simulación de inundación (TR=70 años)*



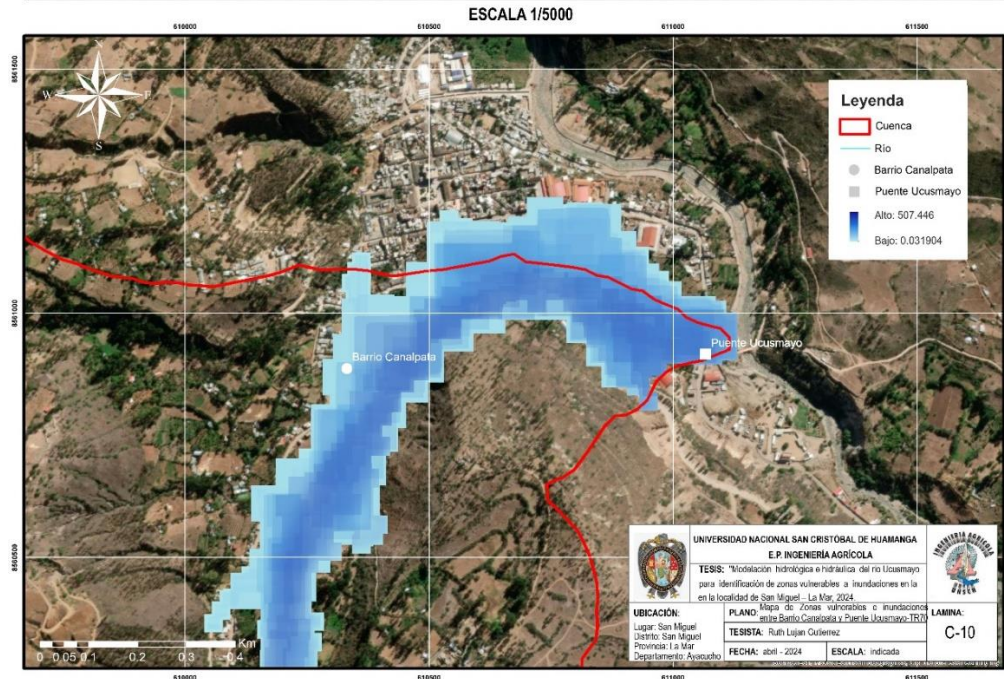
*Nota.* Corte de sección transversal a la simulación de inundación en la Prog. 0+580 KM

El perfil transversal muestra la capacidad del cauce y la magnitud del desborde hacia la planicie, validando la importancia de secciones críticas para definir obras de protección.

**Figura 07**

*Zonas vulnerables a inundaciones en área de estudio - TR 70 años*

**ZONAS VULNEAREABLES E INUNDACIONES ENTRE BARRIO CANALPATA Y PUENTE UCUSMAYO-TR70**



*Nota.* Se presenta mapa de riesgos de la zona (Barrio Canalpata y puente Ucusmayo) para un tiempo de retorno de 70 años.

El mapa de inundación delimita claramente las áreas críticas expuestas, evidenciando la afectación de viviendas e infraestructura, lo que fundamenta la necesidad de medidas de mitigación.

En conjunto, las vistas en planta, perfil y secciones transversales, complementadas con el mapa de zonas inundables, evidencian la vulnerabilidad del área entre Canalpata y el puente Ucusmayo frente a un periodo de retorno de 70 años. El modelado en HEC-RAS permitió identificar la pérdida de capacidad hidráulica del cauce, la propagación del flujo hacia planicies adyacentes y la afectación directa de viviendas e infraestructura, resultados que coinciden con estudios previos sobre cuencas andinas de respuesta rápida (Flores, 2023; Santillán, 2022). Asimismo, la integración de insumos pluviométricos, parámetros morfométricos y simulaciones hidráulicas refuerza la utilidad de estos modelos para la gestión del riesgo de desastres (MINAM, 2019; Medina & Blas, 2021). Estos hallazgos aportan una base técnica sólida para la planificación de medidas de mitigación y la ordenación territorial en San Miguel.

## CONCLUSIONES

1. La regionalización hidrológica permitió caracterizar con precisión el régimen de precipitación en la cuenca del río Ucusmayo, validando los datos mediante el método de doble masas y el análisis del DEM. Se evidenció una alta variabilidad espacial, con precipitaciones máximas diarias entre 21.10 y 46.80 mm, información clave para la planificación y gestión del recurso hídrico en la zona.
2. La modelación hidrológica realizada en HEC-HMS permitió estimar caudales pico de 16.2 m<sup>3</sup>/s (Tr = 5 años) hasta 55.0 m<sup>3</sup>/s (Tr = 500 años), confirmando la rápida respuesta hidrológica de la cuenca y su vulnerabilidad frente a eventos de lluvias extremas.
3. La modelación hidráulica en HEC-RAS delimitó con precisión las zonas críticas de inundación entre Canalpata y el puente Ucusmayo. El área afectada aumentó progresivamente de 98,967 m<sup>2</sup> (Tr = 5 años) a 227,189 m<sup>2</sup> (Tr = 500 años), evidenciándose pérdida de capacidad del cauce, propagación del flujo hacia planicies adyacentes y afectación directa de viviendas, vías y áreas agrícolas. Estos resultados constituyen una evidencia técnica concreta para priorizar acciones de protección en los sectores más expuestos, en línea con los lineamientos del MINAM (2019), CENEPRED (2014) y SENAMHI (2021).
4. En La integración de la regionalización pluviométrica, la modelación hidrológica con HEC-HMS y la simulación hidráulica con HEC-RAS permitió caracterizar integralmente la amenaza hidrológica del río Ucusmayo y establecer una línea base científica para la gestión del riesgo. Con base en esta información, se recomienda implementar medidas estructurales (defensas ribereñas, diques y encauzamientos en tramos críticos) y no estructurales (ordenamiento territorial, delimitación de fajas marginales, mantenimiento del cauce y sistemas de alerta temprana). Estas acciones responden a lineamientos institucionales de reducción de desastres en cuencas altoandinas (CENEPRED, 2023; ANA, 2022; Flores, 2023; Santillán, 2022).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AgroPerú (2025). *Perú registró eventos climáticos extremos en 2024*. API. <https://www.agroperu.pe/peru-registro-eventos-climaticos-extremos-en-2024/?utm>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2022). *Informe técnico: Evaluación de riesgos hidrológicos en cuencas altoandinas*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. [https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/file\\_content/05 MEMORIA%20ANUAL%202022 Final 0.pdf](https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/file_content/05_MEMORIA%20ANUAL%202022_Final_0.pdf)
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). (2023). *Informe estadístico de emergencias por fenómenos naturales en el Perú (2003-2023)*. <https://www.gob.pe/institucion/cenepred/informes-publicaciones>
- Chereque, W. (1991). Hidrología (segunda). *Pontificia Universidad Católica del Perú*. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5662>
- EOS Data Analytics. (s. f.). *Modelo Digital de Elevación (DEM) de la cuenca del río Ucusmayo* [Dataset]. LandViewer. Recuperado el 3 de marzo de 2025 de <https://eos.com/landviewer/>
- Flores, D. (2023). *Modelamiento hidráulico para determinar el predimensionamiento de diques de encauzamiento en la Quebrada del Diablo, Región Tacna* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio institucional de la UNJBG. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3408863>
- Gutierrez, C. (2014), *Hidrología Básica y Aplicada*. Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6758>
- Medina, J., Blas, F. (2021). *Modelamiento hidrológico e hidráulico del río Yuracyacu para identificar zonas vulnerables por máximas avenidas, ciudad Nueva Cajamarca – San Martín*. UCSS. <https://hdl.handle.net/20.500.14095/1073>
- MINAM. (2019). *Mapa nacional de cobertura vegetal*. Ministerio del Ambiente, Dirección General de Ordenamiento Territorial. Lima, Perú. <https://geoservidor.minam.gob.pe>
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (s. f.). Zonificación Ecológica Económica (ZEE) de Ayacucho – Mapa edafológico [Mapa]. Geoportal MINAM. <https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/ayacucho/>

Organización Meteorológica Mundial. (2020), *Terminos hidrológicos*. Organización Meteorológica Mundial.  
[https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/13928/1/Boletin\\_OMM\\_70\\_2\\_%283%29.pdf](https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/13928/1/Boletin_OMM_70_2_%283%29.pdf)

Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). (2021). *Cambio climático 2021: Bases físicas*. Contribución del Grupo de trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cambridge University Press.  
[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SPM\\_Spanish.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf)

Santillan, L. (2022). *Modelación hidrológica e hidráulica del Rio Chalaco, para el diseño de Puente Chalaco, cuenca Medio Alto Piura* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio institucional de la UNALA.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12996/5662>

SENAMHI. (2021). *Boletín climático nacional 1993–2021: Registro de precipitaciones y temperaturas*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe>

Silvera, E., y Mendoza, M. (2022). *Determinación de superficie de inundación del rio Chumbao en el distrito de San Jerónimo, mediante el modelo numérico HEC-RAS* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana Unión]. Repositorio institucional de la UPU. <http://hdl.handle.net/20.500.12840/5686>

Vélez, M. (2000), *Hidrología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia.  
<https://bit.ly/48Hpdpq>

Villón, M. (2004), *Hidrología*. MaxSoft.  
<https://es.scribd.com/document/414668809/Hidrologia-by-Maximo-Villon-pdf>