



# **UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”**



**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA**

**“APLICACIÓN DEL MÉTODO NUMÉRICO HEC-RAS PARA EL  
PRIMER KILOMETRO DEL CANAL ALIMENTADOR  
(BOCATOMA RACA RUMI) DEL RESERVORIO DE  
TINAJONES”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:**

**LICENCIADO EN FÍSICA**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. LLONTOP SILVA, MARGARITA LIDIA**

**Bach. ZUÑIGA CHAFLOQUE, LISBERT KEILA**

**Marzo - 2018**

**Lambayeque – PERÚ**



# UNIVERSIDAD NACIONAL "PEDRO RUIZ GALLO"



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

"APLICACIÓN DEL MÉTODO NUMÉRICO HEC-RAS PARA EL  
PRIMER KILOMETRO DEL CANAL ALIMENTADOR  
(BOCATOMA RACA RUMI) DEL RESERVORIO DE TINAJONES"

Tesis para optar el título de LICENCIADO EN FÍSICA

Presentado y asesorado por:

Bach. Fis. LLONTOP SILVA, MARGARITA LIDIA

Autor

Bach. ZUÑIGA CHAFLOQUE, LISBERT KEILA

Autor

Lic. Jesús Lozano Alvarado  
Asesor

Lambayeque – Perú

2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”**  
**Facultad de Ciencias Físicas y**  
**Matemáticas**  
**Escuela Profesional de Física**

Los firmantes, por la presente certifican que han leído y recomiendan a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas la aceptación de la tesis **“APLICACIÓN DEL MÉTODO NÚMÉRICO HEC-RAS PARA EL PRIMER KILOMETRO DEL CANAL ALIMENTADOR (BOCATOMA RACA RUMI) DEL RESERVORIO DE TINAJONES”**, presentado por las Bachilleres Margarita Lidia Llontop Silva y Lisbert Keila Zuñiga Chafloque, en cumplimiento de los requisitos necesarios para obtener el Título Profesional de Licenciado en Física.

  
Ing. Adolfo Román Risco Vélez  
Presidente  
Mg. Ing. Jacinto Guillermo Uceda Pisfil  
Secretario  
Lic. Fis. Francisco Solano Salazar Ordinola  
Vocal

#### **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de investigación a mis padres y hermanos, por su amor, paciencia, comprensión y apoyo incondicional para terminar mi carrera.

**Lidia Llontop**

Dedico este trabajo de investigación a mis padres y hermanos, por su amor paciencia, comprensión y apoyo incondicional para terminar mi carrera.

**Lisbert Zuñiga**

## AGRADECIMIENTO

Este trabajo de investigación fue una experiencia inolvidable, porque nos permitió trabajar en conjunto, fortalecer nuestra amistad y sobre todo nos proporcionó la satisfacción de desarrollar una investigación, en especial en el campo de la mecánica de fluidos; sin embargo, no habría sido posible realizarlo sin la participación de personas e instituciones que nos apoyaron durante el desarrollo de nuestra tesis, a los cuales les estamos agradecidos y los hacemos mención.

A Dios por darnos la vida y las fuerzas para seguir cada día adelante y hacer realidad este sueño anhelado, a nuestros padres, hermanos y amigos, por su apoyo incondicional durante nuestra formación universitaria, y en esta última etapa.

A la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, por darnos la oportunidad de estudiar y ser profesionales, a nuestros profesores de la Escuela de Física de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, porque todos aportaron a nuestra formación, en especial por sus enseñanzas y sobre todo por su amistad.

A nuestro asesor de Tesis, Ms. Lic. Jesús Lozano Alvarado por el apoyo y asesoramiento durante el desarrollo de nuestro proyecto de tesis.

Al Proyecto Especial Olmos Tinajones (PEOT), y al Ing. Juan Saavedra Jiménez Gerente General del PEOT, que nos facilitó la información de los caudales diarios, registrados en la estación hidrológica de la bocatoma Raca Rumi, entre el 01 de febrero de 1998 al 31 de agosto del 2014, y a la Junta de usuarios del distrito de riego Chancay-Lambayeque, que nos proporcionó información histórica, registrados en la bocatoma Raca Rumi, entre enero de 1966 y diciembre de 1996.

Son muchas las personas que han formado parte de nuestra vida universitaria a las que nos encantaría agradecerles por su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía, todas ellas quedan en nuestros recuerdos, sin importar en donde estén, queremos darles las gracias por formar parte de nuestras vidas y recuerdos, por todo lo que nos han brindado.

## RESUMEN

### ***“Aplicación del modelo numérico HEC-RAS para el primer kilómetro del canal alimentador (bocatoma Raca Rumi) del reservorio de Tinajones”***

La población, las áreas agrícolas, infraestructuras hidráulicas que se encuentran cerca al cauce del río Chancay, están expuestos al aumento y disminución del caudal del río, que en periodos extraordinarios como El Niño, produce un gran aumento de su caudal y por ende ocasiona grandiosas pérdidas económicas en el departamento de Lambayeque.

A nivel general, en el presente trabajo se analiza y determina la variabilidad de los caudales históricos del río Chancay, y se aplica el modelo hidráulico (HEC-RAS) para evaluar escenarios de variación del nivel del agua en el primer kilómetro del canal de alimentación (Raca Rumi) hacia el reservorio Tinajones.

En una primera etapa se analizó la información histórica de los caudales diarios, mensuales y máximos anuales de la Bocatoma Raca Rumi, llegándose a determinar el ciclo anual y los caudales máximos anuales.

En una segunda etapa se determinó los periodos de retornos de 10, 20, 50 y 100 años de los caudales máximos, usando las metodologías empírica, Nash y Gumbel, llegando a determinar que el método de Gumbel produce caudales de 25 m<sup>3</sup>/s más altos a los obtenidos con el método de Nash.

En una tercera etapa se aplicó el modelo HEC-RAS para el primer kilómetro del canal alimentador (bocatoma Raca Rumi) hacia el reservorio de Tinajones y se evalúan seis escenarios de flujo de caudal a través del canal, llegándose a determinar que las alturas del nivel de agua que podrían alcanzar en cada uno de los escenarios.

**Palabras clave:** Modelo HEC-RAS, Bocatoma Raca Rumi, Reservorio Tinajones.

## **ABSTRACT**

### ***"Application of the HEC-RAS numerical model for the first kilometer of the feeder channel (Bocatoma Raca Rumi) of the Tinajones reservoir"***

The population, the agricultural areas, hydraulic infrastructures that are close to the channel of the river Chancay, they are exposed to the increase and decrease of the flow of the river, which in extraordinary periods such as El Niño, produces a great increase in its flow and therefore causes great economic losses in the department of Lambayeque.

At a general level, in the present work, the variability of the historical flows of the Chancay River is analyzed and determined, and the hydraulic model (HEC-RAS) is applied to evaluate scenarios of variation of the water level in the first kilometer of the feeding channel (Raca Rumi) to the Tinajones reservoir.

In a first stage, the historical information of the daily, monthly and maximum annual flows of the Bocatoma Raca Rumi was analyzed, arriving to determine the annual cycle and the maximum annual flows.

In a second stage the return periods of 10, 20 50 and 100 years of the maximum flow were determined, using empirical, Nash and Gumbel, methodologies arriving to determine that the Gumbel method produces flow rates of 25 m<sup>3</sup>/s higher than those obtained with the Nash method.

In a third stage applied the HEC-RAS model for the first kilometer of the feeder channel (Bocatoma Raca Rumi) to the Tinajones reservoir and six flow flow scenarios are evaluated through the channel, arriving to determine that the heights of the level of water that could reach in each one of the scenarios..

Key words: HEC-RAS Model, Bocatoma Raca Rumi, Tinajones Reservoir.

# INDICE

Pág.

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| DEDICATORIA.....   | IV                            |
| AGRADECIMIENTO .....   | V                             |
| RESUMEN.....   | VI                            |
| ABSTRACT .....   | VII                           |
| CONTENIDO .....  | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| LISTA DE FIGURAS .....   | X                             |
| <b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>1</b>                      |
| 1.1 INTRODUCCIÓN .....   | 1                             |
| 1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN PROBLEMÁTICA .....                       | 2                             |
| 1.3 SITUACIÓN DEL PROBLEMA .....   | 2                             |
| 1.4 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN.....                                    | 2                             |
| 1.4.1 <i>Objetivo General</i> .....                                      | 2                             |
| 1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....                                 | 3                             |
| 1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN .....                | 3                             |
| 1.6 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....                                  | 3                             |
| 1.7 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHANCAY-LAMBAYEQUE .....            | 3                             |
| 1.7.1 <i>Geografía</i> .....   | 3                             |
| 1.7.2 <i>Cuenca</i> .....  | 4                             |
| 1.7.3 <i>Área de estudio</i> .....                                       | 5                             |
| 1.7.4 <i>Clima de la cuenca del río Chancay-Lambayeque</i> .....         | 8                             |
| <b>2 MARCO TEÓRICO .....</b>   | <b>11</b>                     |
| 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....                               | 11                            |
| 2.2 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS .....   | 12                            |
| 2.3 METODOLOGÍA DE MODELO HIDRÁULICO.....                                | 13                            |
| <b>3 MATERIALES .....</b>  | <b>21</b>                     |
| 3.1 INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA DE LA BOCATOMA RACA RUMI..... | 21                            |
| 3.2 SOFTWARE DE MODELO NUMÉRICO HEC-RAS .....                            | 22                            |
| <b>4 MÉTODOS .....</b>   | <b>25</b>                     |
| 4.1 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN .....                        | 25                            |
| 4.1.1 <i>Calculo de parámetros estadístico</i> .....                     | 25                            |



|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.1.2    | <i>Periodo de Retorno</i> .....   | 26        |
| 4.1.3    | <i>Método para calcular caudales máximos</i> .....  | 26        |
| 4.2      | METODOLOGÍAS DE IMPLEMENTACIÓN DEL MODELADO HEC-RAS.....  | 29        |
| 4.2.1    | <i>Iniciar un nuevo proyecto</i> .....  | 29        |
| 4.2.2    | <i>Ingresar los datos geométricos del canal</i> .....   | 30        |
| 4.2.3    | <i>Ingresar de los datos del flujo y condiciones iniciales</i> .....  | 32        |
| 4.2.4    | <i>Ejecución de la simulación (cálculos hidráulicos)</i> .....  | 32        |
| 4.2.5    | <i>Visualización e Impresión de Resultados</i> .....  | 33        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS</b> .....   | <b>35</b> |
| 5.1      | ANÁLISIS DE LOS CAUDALES Y PERIODOS DE RETORNO CALCULADOS PARA LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA DE LA BOCATOMA RACA RUMI .....       | 35        |
| 5.1.1    | <i>Caudales diarios</i> .....   | 35        |
| 5.1.2    | <i>Caudales promedios mensuales</i> .....   | 39        |
| 5.1.3    | <i>Caudales máximos anuales</i> .....   | 41        |
| 5.2      | IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO HEC-RAS PARA EL PRIMER KILÓMETRO DEL CANAL DE ALIMENTACIÓN AL RESERVORIO TINAJONES ..... | 58        |
| 5.2.2    | <i>Resultados de los Escenarios de simulación</i> .....   | 65        |
| 5.3      | VALIDACIÓN DEL MODELADO DEL PRIMER KILÓMETRO DEL CANAL DE ALIMENTACIÓN AL RESERVORIO DE TINAJONES .....                     | 69        |
| 5.4      | MODELADO DEL RIO CHANCAY EN LA SECCIÓN CERCANA A LA ESTACIÓN RACA RUMI .....  | 73        |
| 5.4.1    | <i>Modelado del Rio Chancay a través de la formulación teórica</i> .....  | 73        |
| 5.4.2    | <i>Modelado del Rio Chancay a través del modelo HEC-RAS</i> .....   | 74        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....   | <b>77</b> |
| 6.1      | CONCLUSIONES .....  | 77        |
| 6.2      | RECOMENDACIONES.....  | 79        |
|          | <b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | <b>81</b> |
|          | <b>ANEXOS</b> .....   | <b>83</b> |
|          | PROGRAMA MATLAB PARA DETERMINAR LOS PERIODOS DE RETORNOS DEL CAUDAL MÁXIMO POR EL MÉTODO DE GUMBEL .....                    | 83        |
|          | PROGRAMA MATLAB PARA DETERMINAR LOS PERIODOS DE RETORNOS DEL CAUDAL MÁXIMO POR EL MÉTODO DE NASH .....                      | 84        |
|          | IMÁGENES DE LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA DE LA BOCATOMA RACA RUMI.....   | 85        |

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1: PRIMER KILÓMETRO DEL CANAL DE ALIMENTACIÓN DESDE LA BOCATOMA RACA RUMI HACIA EL RESERVORIO TINAJONES   | 6  |
| FIGURA 2: PLANO DE UBICACIÓN DE LA BOCATOMA RACA RUMI E INICIO DEL CANAL ALIMENTADOR   | 7  |
| FIGURA 3: ENERGÍA TOTAL EN UNA SECCIÓN DE UN CANAL   | 14 |
| FIGURA 4: ELEMENTOS DE LA ENERGÍA POR UNIDAD DE PESO   | 15 |
| FIGURA 5: REPRESENTACIÓN DE LOS TÉRMINOS DE LA ECUACIÓN DE LA ENERGÍA  | 16 |
| FIGURA 6: MENÚ DE INICIO DEL PROYECTO SIMULACION_CANAL.PRJ   | 30 |
| FIGURA 7: EJEMPLO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DEL PRIMER KILÓMETRO DEL CANAL   | 31 |
| FIGURA 8: EJEMPLO, DEFINICIÓN DE PARÁMETROS ASOCIADOS A CADA SECCIONES TRANSVERSALES   | 31 |
| FIGURA 9: EJEMPLO DE LA EJECUCIÓN DE UNA SIMULACIÓN HEC-RAS  | 33 |
| FIGURA 10: CAUDALES IARIOS REGISTRADOS EN LA BOCATOMA RACA RUMI, PERIODO 1998 A 2014.  | 36 |
| FIGURA 11: HISTOGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS CAUDALES DIARIOS REGISTRADOS DURANTE 1998 A 2014  | 37 |
| FIGURA 12: CAUDALES PROMEDIOS MENSUALES REGISTRADOS EN LA BOCATOMA RACA RUMI, PERIODO 1966 A 2014  | 39 |
| FIGURA 13: HISTOGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS CAUDALES MENSUALES REGISTRADOS DURANTE 1966 A 2014  | 40 |
| FIGURA 14: CAUDALES PROMEDIO MÁXIMOS ANUALES, REGISTRADOS EN LA BOCATOMA RACA RUMI, DURANTE LOS AÑOS 1966 AL 2014  | 42 |
| FIGURA 15: DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA DE LOS CAUDALES PROMEDIOS MÁXIMOS ANUALES   | 43 |
| FIGURA 16: PERIODOS DE RETORNOS DE CAUDALES MÁXIMOS, CALCULADOS POR EL MÉTODO EMPÍRICO PARA LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA BOCATOMA RACA RUMI, 1966 – 2014                                  | 47 |
| FIGURA 17: PERIODOS DE RETORNOS DE CAUDALES MÁXIMOS, CALCULADOS POR EL MÉTODO GUMBEL PARA LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA BOCATOMA RACA RUMI, 1966 – 2014                                    | 50 |
| FIGURA 18: PERIODOS DE RETORNOS DE CAUDALES MÁXIMOS, CALCULADOS POR EL MÉTODO NASH PARA LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA BOCATOMA RACA RUMI, 1966 - 2014                                      | 55 |
| FIGURA 19: COMPARACIÓN DE LOS PERIODOS DE RETORNO DE CAUDALES MÁXIMOS, CALCULADOS POR LOS MÉTODOS GUMBEL Y NASH PARA LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA BOCATOMA RACA RUMI, PERIODO 1966 A 2014 | 57 |
| FIGURA 20: FORMA GEOMÉTRICA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL CANAL TRAPEZOIDAL  | 58 |
| FIGURA 21: IMAGEN DE LOS ARCHIVOS DE CONFIGURACIÓN DEL MODELO HEC-RAS IMPLEMENTADO PARA EL PRIMER KILÓMETRO DEL CANAL DE ALIMENTACIÓN.   | 59 |
| FIGURA 22: DEFINE E INGRESA LA INFORMACIÓN GEOMÉTRICA DEL PRIMER KILÓMETRO DEL CANAL DE ALIMENTACIÓN HACIA EL RESERVORIO TINAJONES   | 60 |
| FIGURA 23: INTERFACE DONDE SE IMPLEMENTA Y AGREGAN LAS SECCIONES TRANSVERSALES DEL CANAL DE ALIMENTACIÓN.  | 61 |
| FIGURA 24: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UNA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL CANAL DE ALIMENTACIÓN   | 62 |
| FIGURA 25: ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA EL PRIMER KILÓMETRO DEL CANAL DE ALIMENTACIÓN HACIA EL RESERVORIO TINAJONES   | 63 |
| FIGURA 26: EJECUCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN   | 64 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 27: RESULTADOS DE LOS SEIS (06) ESCENARIOS DE SIMULACIÓN CAUDALES Y ALTURA DEL NIVEL AGUA<br>ALCANZADOS EN EL PRIMER KILÓMETRO DEL CANAL ALIMENTADOR                        | 66 |
| FIGURA 28: ALTURA DE NIVEL DE AGUA ALCANZADO EN EL CANAL ALIMENTADOR PARA CADA DE LOS SEIS ESCENARIOS DE<br>SIMULACIÓN (10, 20, 50, 70, 100 Y 120 M <sup>3</sup> S <sup>-1</sup> ) | 67 |
| FIGURA 29: NIVELES DE AGUA ALCANZADOS ENTRE LA SECCIÓN 5 Y 6 PARA LOS SEIS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN  | 68 |
| FIGURA 30: NIVEL DE AGUA EN EL CANAL ALIMENTADOR, PARA LOS SEIS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN   | 68 |
| FIGURA 31: VALORES A LAS DIMENSIONES DEL CANAL ALIMENTADOR DEL RESERVORIO TINAJONES  | 70 |
| FIGURA 32: VALORES DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL RIO CHANCAY EN LA ZONA CERCANA A LA BOCATOMA RACA RUMI,<br>CON PENDIENTE = 1.5 ‰, COEFICIENTE DE RUGOSIDAD N = 0.03.              | 73 |
| FIGURA 33: NIVELES A AGUA ALCANZADO EN CADA UNO DE LOS ESCENARIOS EVALUADOS EN LA SECCIÓN DEL RIO<br>CHANCAY   | 75 |
| FIGURA 34: TRAMO DEL CANAL ALIMENTADOR HACIA EL RESERVORIO TINAJONES   | 85 |
| FIGURA 35: PUENTE RACA RUMI UBICADO SOBRE LA CARRETERA CERCANA A LA BOCATOMA RACA RUMI   | 85 |
| FIGURA 36: FLUJO DE AGUA QUE INGRESA AL CANAL ALIMENTADOR DESDE LA BOCATOMA RACA RUMI HACIA EL<br>RESERVORIO TINAJONES   | 86 |
| FIGURA 37: VISTA DEL SISTEMA DE COMPUERTAS DE LA BOCATOMA RACA RUMI.   | 86 |
| FIGURA 38: CERCO QUE LIMITA EL INGRESO A LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA EN LA BOCATOMA RACA RUMI  | 87 |
| FIGURA 39: SISTEMA DE ELEVACIÓN DE COMPUERTAS DE LA BOCATOMA RACA RUMI   | 87 |
| FIGURA 40: SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA PARA SER DERIVADA HACIA EL CANAL ALIMENTADOR PARA EL RESERVORIO<br>TINAJONES   | 88 |
| FIGURA 41: VISTA DE LA BOCATOMA RACA RUMI, ANTES DE INICIAR EL SECTOR REGULADO DE LA CUENCA CHANCAY-<br>LAMBAYEQUE.  | 88 |
| FIGURA 42: VISTA DE LA BOCATOMA RACA RUMI, POSTERIOR AL SECTOR REGULADO DE LA CUENCA CHANCAY-<br>LAMBAYEQUE.   | 89 |
| FIGURA 43: VISTA DEL RIO CHANCAY ANTES DE LLEGAR A LA BOCATOMA RACA RUMI, EN UNA PARTE DEL SECTOR NO<br>REGULADO DE LA CUENCA CHANCAY-LAMBAYEQUE                                   | 89 |

## Lista de Tablas

|  |    |
|--|----|
| TABLA 1: INFORMACIÓN DESCRIPTIVA DE LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA RACA RUMI.....   | 22 |
| TABLA 2: $YN$ y $\sigma N$ DESVIACIÓN ESTÁNDAR EN FUNCIÓN DE LOS AÑOS .....  | 27 |
| TABLA 3: ESTADÍSTICOS DE LOS CAUDALES DIARIOS REGISTRADOS EN LA BOCATOMA DE RACA RUMI (1998 A 2014) ...  | 38 |
| TABLA 4: ESTADÍSTICOS DE LOS CAUDALES PROMEDIOS MENSUALES REGISTRADOS EN LA BOCATOMA DE RACA RUMI,<br>PERIODO 1966 A 2014 .....  | 41 |
| TABLA 5: CÁLCULO DE PERIODOS DE RETORNO DE LOS CAUDALES MÁXIMOS CON EL MÉTODO EMPIRICO (CAUDALES<br>MÁXIMOS ANUALES VS DISTRIBUCIÓN PROBABILISTICA) .....  | 44 |
| TABLA 6: CAUDALES MÁXIMOS PARA CÁLCULO DE PERIODOS DE RETORNOS POR EL MÉTODO DE GUMBEL .....   | 49 |
| TABLA 7: CAUDALES MÁXIMOS PARA CÁLCULO DE PERIODOS DE RETORNOS POR EL MÉTODO DE NASH .....   | 53 |
| TABLA 8: CAUDALES MÁXIMOS ASOCIADOS A LOS PERIODOS DE RETORNOS, CALCULADOS POR EL MÉTODO DE NASH Y<br>GUMBEL .....   | 56 |
| TABLA 9: ESCENARIOS DE SIMULACIÓN, SE EVALÚAN SEIS POSIBLES DE CAUDALES.....   | 63 |
| TABLA 10: RESULTADOS DE LOS SEIS (06) ESCENARIOS DE SIMULACIÓN CAUDALES Y ALTURA DEL NIVEL AGUA ALCANZADOS<br>EN EL PRIMER KILÓMETRO DEL CANAL ALIMENTADOR .....   | 65 |
| TABLA 11: PARÁMETROS ASOCIADOS A UN CANAL TRAPEZOIDAL .....  | 70 |
| TABLA 12: PARAMETRÓS HIDRAULICOS CALCULADOS PARA LA SECCIÓN TRAPEZOIDAL DEL CANAL ALIMENTADOR DEL<br>RESERVORIO TINAJONES, PARA CADA UNO DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.....                            | 71 |
| TABLA 13: VALIDACIÓN DEL MODELO HEC-RAS VS LA FORMULACIÓN TEÓRICA DE MANNING .....   | 72 |
| TABLA 14: PARÁMETROS HIDRÁULICOS CALCULADOS A TRAVÉS DE LA FORMULA TEÓRICA DE MANNING PARA LA SECCIÓN<br>TRAPEZOIDAL DEL RIO CHANCAY EN LA ZONA CERCANA A LA ESTACIÓN DE RACA RUMI.....                  | 74 |
| TABLA 15: RESULTADOS DE LOS SEIS (06) ESCENARIOS DE SIMULACIÓN CAUDALES Y LAS ALTURAS DEL NIVEL AGUA<br>ALCANZADOS EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL RIO CHANCAY EN LA ZONA CERCANA A LA ESTACIÓN RACA RUMI. | 75 |

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 *Introducción*

El presente trabajo consistió en aplicar el modelo hidráulico HEC-RAS para el primer kilómetro del canal de alimentación (bocatoma Raca Rumi) hacia el reservorio de tinajones, y evaluar diversos escenarios de flujos de caudales en el primer kilómetro del canal de alimentación.

En una primera etapa se analiza la información histórica de los caudales diarios, mensuales y máximos anuales registrados en la estación hidrológica de la Bocatoma Raca Rumi (ubicada en el inicio del sector regulado de la cuenca Chancay-Lambayeque), llegándose a determinar que los caudales presentan un ciclo anual, con caudales máximos durante los meses verano y mínimos durante los meses de junio a setiembre de cada año.

En una segunda etapa se determina los periodos de retornos de 10, 20, 50 y 100 años de los caudales máximos a partir de la información de caudales recolectados en la Bocatoma Raca Rumi, usando las metodologías de Nash y Gumbel, llegando a determinar que el método de Gumbel produce caudales de 25 m<sup>3</sup>/s más altos a los obtenido con el método de Nash.

En una tercera etapa se aplicó el modelo HEC-RAS para el primer kilómetro del canal alimentador (bocatoma Raca Rumi) hacia el reservorio de Tinajones y se evalúan seis escenarios de flujo de caudal a través del canal, llegándose a determinar que los tirantes (las alturas del nivel de agua) alcanzados en cada uno de los escenarios tienen una relación proporcional al caudal que fluye a través del canal, debido a la forma trapezoidal del canal de alimentación hacia el reservorio de Tinajones.

## **1.2 Planteamiento y formulación problemática**

La población, las actividades de los sectores agrícolas, industriales e infraestructuras en general que se ubican cerca al cauce del río Chancay, están expuestos a los regímenes aumento y disminución del caudal que transcurre por el río Chancay. En condiciones de eventos extremos como El Niño, el caudal del río Chancay causa cuantiosas pérdidas económicas en la población Lambayecana. Por lo tanto es necesario analizar desde un punto de vista de las ciencias físicas la variabilidad del río Chancay, a través del uso de un modelo hidráulico (HEC-RAS) y evaluar escenarios de la variación del nivel del agua en el primer kilómetro del canal de alimentación (Raca Rumi) hacia el reservorio tinajones.

## **1.3 Situación del Problema**

Existen escasa investigación o temas de tesis referente al análisis cuantitativo de la variación temporal del caudal del río Chancay, lo cual estaría conllevando a que exista un desconocimiento de las consecuencias que produce el incremento del flujo de agua en el río Chancay sobre la población y las diversas actividades que se dan en los sectores económicos de Lambayeque, en este contexto se propone evaluar diversos escenarios de flujo de caudal en el primer kilómetro del canal de alimentación (Raca Rumi) hacia el reservorio de tinajones.

## **1.4 Objetivo de la investigación**

### **1.4.1 Objetivo General**

Aplicar el modelo hidráulico HEC-RAS y evaluar escenarios de máxima variación del caudal en el primer kilómetro del canal de alimentación (Raca Rumi) hacia el reservorio de tinajones, considerando periodos de retornos de máximas avenidas en el río Chancay (Bocatoma Raca Rumi).

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- ✓ Aplicar el modelo hidráulico HEC-RAS.
- ✓ Determinar los periodos retorno de la información histórica de caudales promedios mensuales (1966 a 1996) y diarios (1998 a 2014) registrados en la estación hidrológica Raca Rumi.
- ✓ Evaluar escenarios de máxima variación del caudal de diversos periodos de retornos en el primer kilómetro del canal de alimentación hacia el reservorio Tinajones.

### **1.5 Justificación e importancia de la investigación**

La cuenca del río Chancay-Lambayeque es una de las cuencas más extensas de la costa peruana y la primera en tener una autoridad de gestión, desde 1992. (DL 653, 1991 Ley de Creación de las Autoridades Autónomas de Cuencas Hidrográficas).

La cuenca, constantemente se ve afectada por desastres naturales, especialmente durante la ocurrencia de eventos extremos El Niño, la cuenca tiene gran importancia, porque en ella se localizan importantes proyectos de exploración minera y grandes obras hidráulicas como el reservorio de Tinajones y por el desarrollo de actividades turísticas, como de los centros arqueológicos Sipán y Sicán

### **1.6 Hipótesis de la investigación**

¿Es posible aplicar el modelo hidráulico HEC-RAS para evaluar la variación del nivel de agua en el primer kilómetro del canal de alimentación (Raca Rumi) hacia el reservorio Tinajones, y determinar caudales máximos de periodos de retornos de 10, 20, 50 y 100 años?.

### **1.7 Descripción de la cuenca del río Chancay-Lambayeque**

#### **1.7.1 Geografía**

El río Chancay-Lambayeque es un corto río de la vertiente del Pacífico, localizado en la costa norte del Perú.



El río Chancay-Lambayeque nace en la laguna de Mishacocha con el nombre de quebrada Mishacocha (cerros Coymolache y los Callejones) a una altitud de 3.800 m, discurriendo su cauce en dirección este a oeste. Posteriormente adopta sucesivamente los nombres de Chicos y Llantén, conociéndose como el de río Chancay-Lambayeque desde su confluencia con el río San Juan hasta el repartidor La Puntilla.

A partir de este punto, el río se divide en tres cursos: Canal Taymi (al norte), río Reque (al sur), y entre ambos el río Lambayeque. Solamente el río Reque desemboca en el océano Pacífico, al norte del Puerto de Etén, mientras que los otros dos ramales, el Lambayeque y el Taymi, no llegan al mar debido a que sus aguas son utilizadas para el riego hasta su agotamiento

### **1.7.2 Cuenca**

La cuenca hidrográfica del río Chancay-Lambayeque está ubicada en el norte del Perú, en los departamentos de Lambayeque y Cajamarca, geográficamente, se encuentra entre 6° 20'S y 6° 56'S (Latitud), y 78° 38'W y 80° 00'W (Longitud).

El río Chancay pertenece a la vertiente del Pacífico, es de régimen irregular y está conformado por los ríos Tacamache y Perlamayo que nacen en la Cordillera Occidental de los Andes. Desde sus nacientes hasta su desembocadura en el mar, su longitud es de 170 km; en su recorrido recibe aportes eventuales principalmente de los ríos Cañada, San Lorenzo, Cirato y Cumbil.

El ámbito de la cuenca se extiende desde la bocatoma Raca Rumi hacia aguas abajo hasta el límite con el océano Pacífico. Esta área constituye el sub distrito de riego regulado y, desde la bocatoma Raca Rumi hacia aguas arriba, se ubica el sub distrito de riego no regulado.

La cuenca hidrográfica limita al norte con la cuenca del río La Leche, por el sur con la cuenca del río Jequetepeque-Saña, por el este con la cuenca del Chotano y por el oeste con el Océano Pacífico. Está situada en la ladera occidental de la cordillera de los Andes, en la zona de la vertiente del Pacífico.

La cuenca del río Chancay-Lambayeque Comprende parte de los departamentos de Cajamarca (provincias de Santa Cruz, parte de Chota, San Miguel y Hualgayoc) y Lambayeque (provincias de Ferreñafe, parte de Chiclayo y Lambayeque). Pertenece a la vertiente del Pacífico y abarca un área de aproximadamente 5 482 km<sup>2</sup>. Limita: a) al oeste con el océano Pacífico, b) al norte con la cuenca Motupe-La Leche, c) al sur con la cuenca Saña y Jequetepeque y d) al este con las cuencas Chamaya y Llaucano.

La cuenca se divide en:

a) Cuenca Baja: desde la desembocadura del río Chancay, hasta el sector de Repartidor de la Puntilla; incluyendo el litoral entre Puerto Etén y Pimentel. En dicho sector adopta el nombre de río Reque.

b) Cuenca Media: desde el Repartidor de la Puntilla hasta el sector de Cirato.

c) La cuenca Alta: desde Cirato hasta los límites de la cuenca (dirección este).

Los caudales del río pueden conocerse con bastante precisión en las secciones artificiales constituidas por obras de derivación que controlar la totalidad del caudal (bocatoma Raca Rumi y presa partidora la Puntilla), excepto para las crecidas excepcionales donde parte del caudal discurre fuera de la presa (como fue el caso para las crecidas del año 1998).

### **1.7.3 Área de estudio**

El área de estudio comprende el primer kilómetro del canal de alimentación de la bocatoma Raca Rumi hacia el reservorio de Tinajones (Figura 1).

La bocatoma Raca Rumi, se encuentra a 283 m.s.n.m., con capacidad de derivar 70 m<sup>3</sup>/s, cuenta con dos compuertas de captación, con un ancho de 10.52 m y un altura de 6 m; tres compuertas de río con un ancho de 5 m y una altura de 6 m y un vertedero fijo de 148 m de largo y 4.8 m de alto, y está diseñada para soportar avenidas de hasta 1,700 m<sup>3</sup>/s (*Figura 2*).

*Figura 1: Primer kilómetro del canal de alimentación desde la bocatoma Raca Rumi hacia el reservorio Tinajones*



*Fuente: Elaboración propia a partir de imagen obtenida de Google earth.*

El canal de alimentación fue construido entre los años 1961 y 1968, tiene 16 kilómetros de largo, de sección trapezoidal, capta las aguas del río Chancay, a través de la bocatoma Raca Rumi y las conduce hacia el oeste, hasta el reservorio de Tinajones. La bocatoma Raca Rumi deriva 70 m<sup>3</sup>/s por el canal alimentador para su almacenamiento en el reservorio Tinajones (*Figura 2*).

*Figura 2: Plano de ubicación de la bocatoma Raca Rumi e inicio del canal alimentador*



*Fuente: Elaboración propia a partir de imagen obtenida de Google Earth*

### **1.7.4 Clima de la cuenca del río Chancay-Lambayeque**

#### **1.7.4.1 Clima costero**

Las condiciones atmosféricas en la costa de la cuenca del río Chancay Lambayeque son estables, debido a la semi permanencia del anticiclón del Pacífico suroriental y el fenómeno de inversión térmica, que se presenta en altitudes variables entre 300 y 1200 metros sobre el nivel del mar; estableciéndose como su nivel promedio los 800 metros de altura. El estrato de aire debajo de este nivel de inversión térmica es fresco y húmedo, en tanto que el aire sobre este nivel es cálido y seco, contribuyendo así en que gran parte del año la zona costera de la cuenca se cubra de una capa nubosa estable asociada a la humedad condensada de las masas de aire marítimas desplazadas sobre la fría corriente peruana.

#### **1.7.4.2 Clima de sierra**

El clima andino de la cuenca se caracteriza por su sequedad y el aumento de amplitud o rango térmico (temperaturas extremas) acorde con las características morfológicas cordilleranas (abrupto territorio), latitud y altitud; sobre todo el último, que establece diversos niveles térmicos altitudinales determinantes del variable clima andino, como el templado cálido en las zonas yungas marinas y fluviales, templado en niveles quechuas, templado-frío en las jalcas y zonas con alturas mayores a 3000 m.s.n.m. con temperaturas medias anuales entre 10°C y 15°C y precipitaciones normales acumuladas entre 600 y 2000 mm.

El inicio y duración del periodo lluvioso está regulado por los patrones de circulación atmosférica amazónica, que por su intensidad permiten el ingreso de masas de aire cálido húmedas a la cuenca alta y media del río Chancay-Lambayeque; generando lluvias regulares de intensidades entre moderadas y altas, pudiendo incluso llegar eventualmente a la cuenca baja o costa propiamente dicha, pero en cantidades disminuidas.

Durante el invierno en altitudes mayores a 3000 m.s.n.m. ocurren heladas poco antes de empezar el día, manifestándose como notables descensos de las temperaturas nocturnas con efectos negativos en la agricultura. Normalmente las lluvias del verano favorecen los cultivos de secano; repercutiendo eventualmente la escasez pluvial sobre cultivos andinos en años de sequía. En años lluviosos como 1982, 1994 y 1998 se sobrepasan ampliamente los requerimientos agrícolas generándose ciertos problemas en materia de productividad; y sobre todo, una serie de servicios y actividades socio económicas por los severos impactos que los llegan a afectar.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes de la investigación**

En el 2010, la Dirección de Estudios de Proyectos Hidráulicos Multisectorial de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) del Ministerio de Agricultura, emitió el informe “Tratamiento de Cauce del Río para el Control de Inundaciones en la Cuenca Chancay Lambayeque”, para ser utilizado como un documento de gestión del recurso hídrico en periodos de estiaje y en periodos de avenidas ordinarias y extraordinarias en la cuenca del río Chancay Lambayeque. En la componente hidráulica utilizaron el modelo HEC-RAS para realizar la simulación hidráulica del río a través de cuatro sectores, considerando un caudal permanente y las características propias para cada sector de la cuenca Chancay Lambayeque, llegándose a determinar que para el tramo no regulado de la cuenca, entre la bocatoma Raca Rumi y el Puente San Carlos, los caudales con periodos de retorno 10, 25 y 50 años, podrían causar el desborde del río provocando la inundación de un área total aproximada de 90, 108 y 120 hectáreas y un área agrícola bajo riego inundable aproximada de 86, 102 y 112 hectáreas respectivamente.

En el 2013, Arriola y Bejarano, publicaron el “Estudio de los Métodos de Análisis Basados en la Superposición de los Componentes de Socavación para Pilares Complejos Aplicados al Puente Reque”, en el cual realizan un análisis comparativo de los métodos basados en la superposición de componentes de socavación para pilares del puente Reque, para lo cual utilizan el modelo numérico HEC-RAS y otras herramientas numéricas, que les permitieron concluir, que la interacción entre la estructura del puente Reque con el río provoca la obstrucción del flujo del río, produciendo en sus bases (pilares y pilotes) un aumento gradual de la socavación, provocando fallas en la estructura del puente Reque.



## **2.2 Definición de términos**

**Cuenca hidrográfica**, es un territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, y es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada divisoria de aguas. El uso de los recursos naturales se regula administrativamente separando el territorio por cuencas hidrográficas.

**Variables hidrográficas**, Según Chow et al., (1994), las precipitaciones y los caudales son variables hidrológicas que son medidas por las estaciones hidrométricas, y son consideradas variables aleatorias.

**Precipitación**, representan el elemento más importante del ciclo hidrológico. Para Fernández (1995), la precipitación, junto con la temperatura, es el elemento climático más influyente en el medio natural, ya que afecta directamente en la distribución de las especies vegetales y animales, y a la vez en las actividades del hombre, como son las agrícolas, las forestales y las económicas entre otras. Según Llamas, (1993), las precipitaciones son un fenómeno físico que describe la transferencia de agua en fase líquida (en forma de lluvia), y en fase sólida (en forma de nieve y granizo), entre la atmósfera y el suelo.

**Caudal**, Según Pizarro et al., (1993), se denomina caudal, al volumen de agua que fluye a través de una sección transversal por unidad de tiempo, donde la unidad de medida más comúnmente empleada es m<sup>3</sup> /s.

**Periodo de retorno**, es el tiempo esperado o tiempo medio entre dos sucesos de baja probabilidad.

**Tirante, altura** o nivel del flujo de agua alcanzado en un canal.

**Modelo Hidráulico**, es un modelo reducido de una cuenca, y permite simular el nivel del agua, para evaluar los efectos de la acción de la inundación causada por

temporales de avenidas de ríos, rotura de represas, e incremento en el caudal de un río o canal.

**Coeficiente de rugosidad (n)**, mide la dificultad que tiene el agua al circular en un canal, dependiendo del material con que esté revestido debido al terminado de la superficie que puede ser muy lisa a muy corrugada. También influyen las propiedades físicas del agua, grado de alteración de la superficie del canal que tendrá durante su vida útil, rugosidad de la superficie al terminar la construcción, vegetación y organismos acuáticos, irregularidades en la secc. transversal del canal, sedimentación y erosión, programa de limpieza y conservación, etc.

**Pendiente (S)**, Es la relación que existe entre el desnivel y la distancia horizontal entre dos puntos del canal. Debe ser la máxima que permita dominar la mayor superficie posible de tierras y que a la vez dé valores de velocidad que no causen erosión del material en que este alojado, ni depósito de azolves. Depende de la pendiente topográfica del terreno en que va a ser alojado el canal.

**Parámetro R o radio hidráulico**, es la relación que existe entre el área hidráulica y el perímetro mojado, depende del ancho de plantilla, tirante y de la inclinación de los taludes.

**Perímetro Mojado**, es el perímetro del área hidráulica en contacto con el agua.

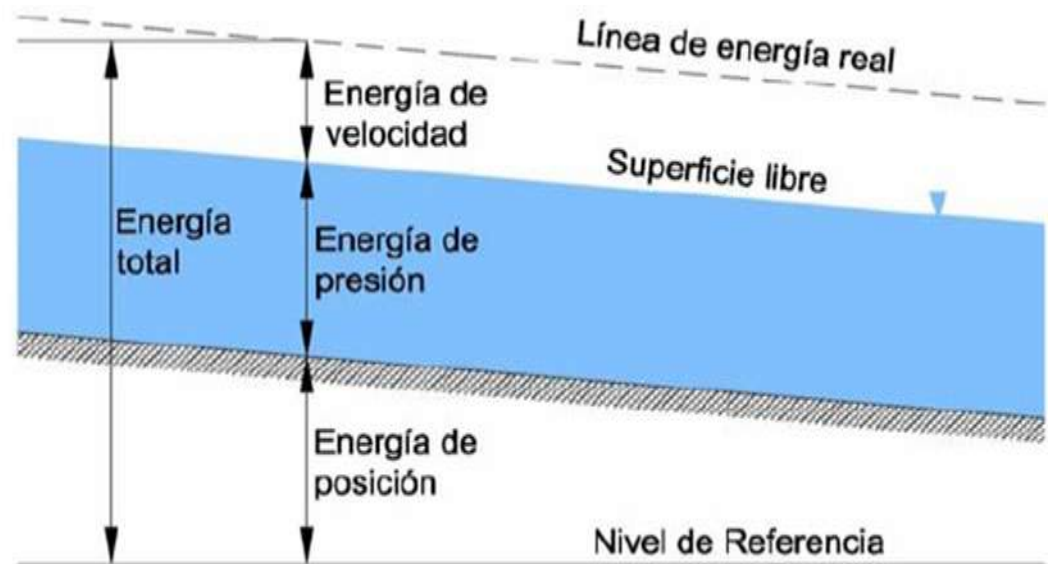
### **2.3 Metodología de modelo hidráulico**

Para determinar la variación de la elevación de la superficie de agua en una sección transversal, partimos de la ecuación de la energía o ecuación de Bernoulli, que define que cualquier línea de corriente que atraviesa una sección de un canal alcanza una energía total que es la suma de las energías de posición, la de presión y la de velocidad, es decir:

$$\text{Energía total} = \text{Energía de posición} + \text{Energía de presión} + \text{Energía de velocidad}$$

Esta relación se muestra en la Figura 3

Figura 3: Energía total en una Sección de un Canal



$$E = Z + y + \alpha \frac{V^2}{2g} = cte \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Dónde:

E = Es la energía total en la sección

Z = Es la energía de posición o elevación

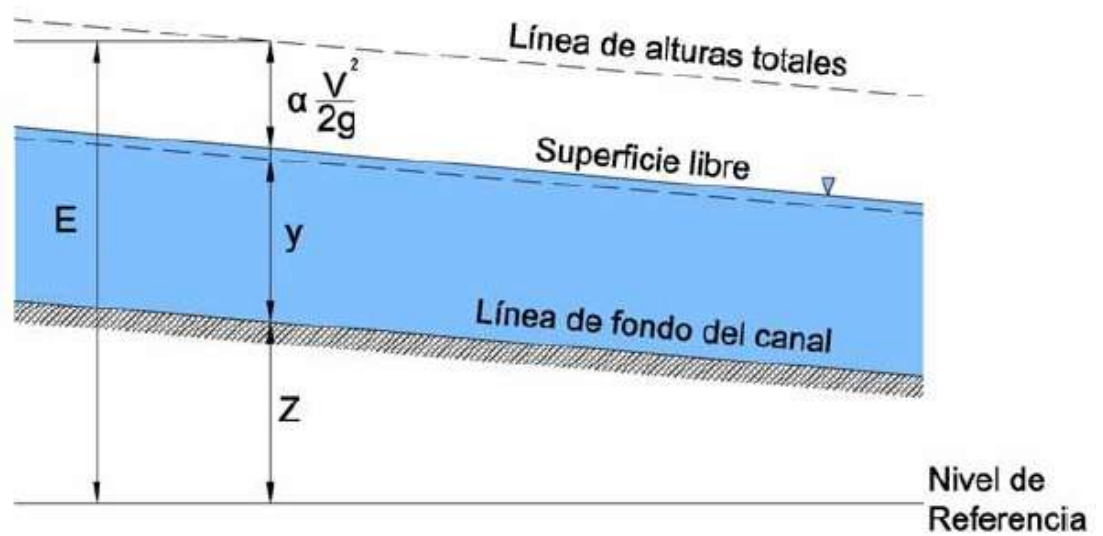
y = Es el tirante en la sección

V = Es la velocidad media que lleva el flujo en esta sección

$\alpha$  = Es el coeficiente de Coriolis para la sección

Estos parámetros se muestran en la Figura 4

Figura 4: Elementos de la energía por unidad de peso



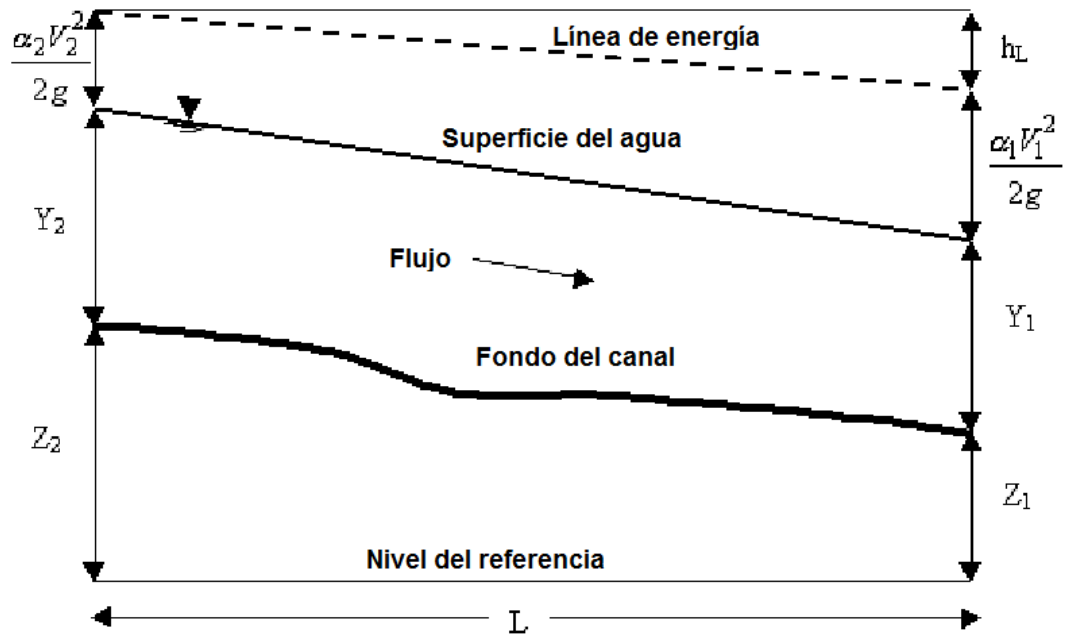
La Ecuación 2.2 es conocida como Ecuación de la Energía, en la Figura 5, se muestra gráficamente la conservación de la energía entre dos secciones transversales adyacentes de un canal.

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Dónde:

- $Y_1, Y_2$  = Profundidad del agua en la Sección Transversal.
- $Z_1, Z_2$  = Elevación del lecho del tramo.
- $V_1, V_2$  = Velocidades promedio ( $Q$  total /  $A$  total)
- $\alpha_1, \alpha_2$  = Coeficientes de Coriolis
- $g$  = Aceleración de la gravedad
- $h_e$  = Pérdida principal de Energía.

Figura 5: Representación de los términos de la ecuación de la energía



Fuente: Adaptado a partir de la imagen del capítulo 2 (página 19) del Manual de Referencia Hidráulica del modelo HEC-RAS 2010, versión 4.1

La pérdida principal de energía ( $h_e$ ) entre dos secciones transversales está relacionada con pérdidas por fricción y pérdidas por contracción y expansión. La ecuación 2.2 representa la pérdida de energía entre dos secciones de un canal.

$$h_e = L \bar{S}_f + C \left[ \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right] \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Dónde:

$L$  = Longitud del tramo

$\bar{S}_f$  = Pendiente de fricción entre dos secciones.

$C$  = Coeficiente de pérdida por expansión o contracción.

Las ecuaciones 2.2 y 2.3 se resuelven iterativamente de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Se asigna la elevación de superficie de agua (nivel de agua) en la sección transversal más alta del canal a modelar (aguas arriba).

2. A partir de la elevación del nivel de agua asumida en la sección transversal más alta, se determina la capacidad de transporte total y la velocidad principal.

3. Con los valores obtenidos en el paso 2, se calcula la pendiente de fricción ( $\overline{S_f}$ ) y se resuelve la ecuación 2.3 para  $h_e$ .

4. Con los valores obtenidos en el paso 2 y 3, se resuelve la ecuación 2.2 y se obtiene la superficie del nivel de agua de la sección transversal 2.

5. Se comparan los valores calculados de la superficie del nivel del agua de la sección transversal 2 con los valores asumidos en el paso 1. Se repiten los pasos del 1 hasta el 5, hasta que la diferencia entre ellos sea de 0.003 m. Esta tolerancia puede ser definida por el usuario.

El criterio utilizado para asumir las elevaciones de la superficie de agua en el proceso iterativo, varía de intento en intento. El primer intento de superficie de agua está basado en proyectar la profundidad del agua de una sección transversal, sobre la siguiente sección transversal.

Para el segundo intento, el programa vuelve a asumir la elevación de la superficie de agua, pero añadida a un 70% del error obtenido en el primer intento (Elevación calculada – Elevación asumida). En otras palabras, la Elevación nueva será igual a Elevación asumida + 0.70 x (Elevación calculada – Elevación asumida).

El tercer y subsiguiente intento es generalmente basado en un método “Secante” proyectando la relación de cambio de las diferencias entre las elevaciones calculadas y asumidas para los dos primeros intentos.

La ecuación 2.4 representa el método de la secante, y se calcula de la siguiente manera:

$$WS_1 = WS_{1-2} - \frac{Err_{1-2} * Err_{asum}}{Err_{dif}} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Dónde:

$WS_1$  = La nueva superficie de agua asumida en una sección

$WS_{i-1}$  = La superficie de agua asumida en la iteración previa

$WS_{i-2}$  = La superficie de agua asumida dos intentos atrás

$Err_{1-2}$  = El error de dos intentos atrás (superficie de agua calculada menos la asumida en la iteración i-2)

$Err\_Asum$  = La diferencia entre las superficies de agua obtenidas en los dos intentos previos.

$$Err\_Asum = WS_{i-2} - WS_{i-1}$$

$Err\_Dif$  = La superficie de agua asumida menos la superficie de agua calculada en la iteración previa (i-1), más el error dos intentos previos ( $Err_{1-2}$ ).

$$Err\_Diff = WS_{i-1} - WS\_Calc_{i-1} + Err_{i-2}$$

El número de iteraciones para cálculos del nivel de agua a través del método de la secante está restringido a un número máximo de iteraciones (el número predeterminado es 20) para balancear el perfil hidráulico. Mientras el programa realiza las iteraciones, mantiene un nivel de superficie de agua tal que produce un mínimo de error entre los valores asumidos y calculados. Esta superficie de agua es llamada “superficie de agua con mínimo error”. Si el número máximo de iteraciones es alcanzado antes de que se produzca un balance, el programa calculará entonces una profundidad crítica (si esta no ha sido ya ingresada). El programa verificará entonces si el error asociado con la superficie de agua con error mínimo, se

encuentra entre uno los rangos de tolerancia predefinida (el programa lo asume con 0.1 m).

Cuando una elevación “balanceada” ha sido obtenida para una sección transversal, se realizan verificaciones para asegurar que la elevación se encuentra en el lado correcto del perfil de altura crítica. Si la elevación balanceada se encuentra en el lado erróneo de la superficie de altura crítica, se asume la altura crítica para la sección transversal.



## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES**

### **3 MATERIALES**

En el presente capítulo se describen los materiales utilizados en el desarrollo del presente proyecto de investigación. Se hace énfasis en la información utilizada y el software del modelo HEC-RAS.

#### **3.1 Información de la estación hidrológica de la bocatoma Raca Rumi**

La información hidrológica utilizada, comprende a dos series de tiempo.

La primera serie corresponde a los caudales diarios, registrados en la estación hidrológica que se encuentra ubicada en el bocatoma Raca Rumi, entre el 01 de febrero de 1998 al 31 de agosto del 2014, esta información fue proporcionada por el Proyecto Especial Olmos Tinajones (PEOT) y fue requerida a través de la solicitud cursada el día 24 de marzo del 2015 por la Bach. Fís. Lidia Llontop, al Ing. Juan Saavedra Jiménez Gerente General del PEOT. La información fue recepcionada en formato digital Excel.

La segunda serie corresponde a los caudales de promedios mensuales, registrados en la bocatoma Raca Rumi, entre enero de 1966 y diciembre de 1996, esta información fue digitalizada del “Estudio de Naturalización de Información del Rio Chancay Año 1997”, presentado por la empresa CAHUA S.A (2005) al Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERG).

Actualmente, la estación hidrológica de la bocatoma Raca Rumi es administrada por la Junta de usuarios del distrito de riego Chancay-Lambayeque, las características y ubicación de la estación hidrológica se encuentran resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1: Información descriptiva de la estación hidrológica Raca Rumi

| Información      | Descripción   |
|------------------|---|
| Estación         | Raca Rumi   |
| Tipo de Estación | Hidrológica   |
| Categoría        | Limnimétrica  |
| Fuente           | Junta de usuarios del distrito de riego<br>Chancay-Lambayeque |
| Latitud          | 6° 38' 00" S  |
| Longitud         | 79° 19' 00" W   |
| Altitud          | 280 m.s.n.m   |
| Cuenca           | Chancay - Lambayeque  |
| ALA <sup>1</sup> | Chancay - Lambayeque  |
| AAA <sup>2</sup> | Jequetepeque - Zarumilla                                      |

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Software de Modelo Numérico HEC-RAS

El software de modelo numérico HEC-RAS fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center), de la fuerza armada de Estados Unidos (EEUU Army Corps), con la finalidad de ser un sistema de análisis de la ingeniería de ríos (Engineering River Analysis System), siendo denominado HEC-RAS. Este software permite al usuario realizar el modelado de flujos tanto estacionarios como no estacionarios. HEC-RAS es un sistema integrado de programas, diseñado para realizar un uso interactivo en un ambiente integrado de multi-tareas y multi-usuarios.

El sistema HEC-RAS contiene tres componentes para realizar análisis hidráulicos unidimensionales aplicados a: (1) cálculos de perfiles hidráulicos en flujos permanentes; (2) simulaciones de flujo no permanente; y (3) cálculos de transporte

<sup>1</sup> ALA, equivale a Administraciones Locales de Agua (Agencia Nacional del Agua).

<sup>2</sup> AAA, equivale a Autoridades Administrativas del Agua (Agencia Nacional del Agua).

de sedimento en fondos y paredes erosionables. Todos estos tres componentes utilizan una misma representación geométrica de datos, y similares rutinas de cálculo geométrico e hidráulico.

El software HEC-RAS tiene la capacidad de desarrollar cálculos de perfiles hidráulicos en flujos permanentes y no permanentes

## **CAPÍTULO IV**

### **MÉTODOS**

## 4 MÉTODOS

### 4.1 Metodologías de análisis de información

#### 4.1.1 Cálculo de parámetros estadístico

En esta etapa se calcularon parámetros estadísticos de promedio y la desviación estándar de las series de datos de caudales diarios y promedios mensuales. Los estadísticos extraen información de una muestra, señalando las características de la población total de los datos, los principales estadísticos son el momento de primer orden (promedio) y segundo orden (varianza).

##### 4.1.1.1 Promedio o media muestral

El promedio, es la tendencia central de la distribución, es considerado el primer momento respecto de al origen de la distribución de la muestra. Se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos. Cuando el conjunto es una muestra aleatoria recibe el nombre de media muestral siendo uno de los principales estadísticos muestral.

Dado  $n$  números  $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , la media muestral se define como:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

##### 4.1.1.2 Desviación estándar

La desviación estándar o desviación típica (denotada con el símbolo  $\sigma$  o  $s$ , dependiendo de la procedencia del conjunto de datos) es una medida de dispersión.

Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer la medida de tendencia central (promedio), sino que también necesitamos conocer la desviación estándar, que presentan los datos en su distribución respecto de la media de la distribución. La desviación estándar equivale a la raíz cuadrada de la varianza.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

#### 4.1.2 Período de Retorno

Se define como el intervalo de tiempo dentro del cual un evento de magnitud Q (caudal), puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio. [Villón 2002]

Si un evento igual o mayor a Q, ocurre una vez en T años, su probabilidad de ocurrencia P, es igual a 1 en T casos, es decir:

$$P = \frac{1}{T} \text{ ó } T = \frac{1}{P} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

Dónde:

P = Probabilidad de ocurrencia de un caudal Q.

T = Período de retorno.

El caudal máximo para un período de retorno será calculado a través de métodos estadísticos.

#### 4.1.3 Método para calcular caudales máximos

Se basa en considerar que el caudal máximo anual, es una variable aleatoria que tiene una cierta distribución (histograma). [Cuanto *mayor sea cantidad de años de registros de caudales, se tendrá una mayor aproximación del caudal máximo para un determinado periodo de retorno*].

Existen diversos métodos estadísticos que dependiendo el tipo de distribución permiten calcular los caudales máximos de retorno, los métodos más usados son Gumbel y Nash. [Villón 2002].

Gumbel y Nash, consideran una distribución de valores extremos, con la única diferencia, que el criterio de Nash es menos rígido que el de Gumbel, pues permite ajustar la distribución por mínimos cuadrados.

#### 4.1.3.1 Método de Gumbel

Para calcular el caudal máximo para un período de retorno, se usa la siguiente ecuación:

$$Q_{m\acute{a}x} = Q_m - \frac{\sigma_Q}{\sigma_N} (\bar{Y}_N - \log T) \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Siendo:

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N Q_i^2 - NQ_m^2}{N-1}} \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

Dónde:

$Q_{m\acute{a}x}$  = Caudal máximo para un periodo de retorno determinado

$N$  = Número de años de registro

$Q_i$  = Caudales máximos anuales registrados

$Q_m = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N}$ , Caudal promedio

$T$  = Período de retorno, en años

$\sigma_N, \bar{Y}_N$  = Constantes en función de  $N$  (años), determinados según Tabla 2.

$\sigma_N$  = Desviación estándar de los caudales.

Tabla 2:  $\bar{Y}_N$  y  $\sigma_N$  desviación estándar en función de los años

| N  | $\bar{Y}_N$ | $\sigma_N$ | N  | $\bar{Y}_N$ | $\sigma_N$ |
|----|-------------|------------|----|-------------|------------|
| 8  | 0.48430     | 0.90430    | 49 | 0.54810     | 1.15900    |
| 9  | 0.49020     | 0.92880    | 50 | 0.54854     | 1.16066    |
| 10 | 0.49520     | 0.94970    | 51 | 0.54890     | 1.16230    |
| 11 | 0.49960     | 0.96760    | 52 | 0.54930     | 1.16380    |
| 12 | 0.50530     | 0.98330    | 53 | 0.54970     | 1.16530    |
| 13 | 0.50700     | 0.99720    | 54 | 0.55010     | 1.16670    |
| 14 | 0.51000     | 1.00950    | 55 | 0.55040     | 1.16810    |
| 15 | 0.51280     | 1.02057    | 56 | 0.55080     | 1.16960    |
| 16 | 0.51570     | 1.03160    | 57 | 0.55110     | 1.17080    |
| 17 | 0.51810     | 1.04110    | 58 | 0.55150     | 1.17210    |
| 18 | 0.52020     | 1.04930    | 59 | 0.55180     | 1.17340    |
| 19 | 0.52200     | 1.05660    | 60 | 0.55208     | 1.17467    |
| 20 | 0.52355     | 1.06283    | 62 | 0.55270     | 1.17700    |
| 21 | 0.52520     | 1.06960    | 64 | 0.55330     | 1.17930    |
| 22 | 0.52680     | 1.07540    | 66 | 0.55380     | 1.18140    |
| 23 | 0.52830     | 1.08110    | 68 | 0.55430     | 1.18340    |



| <b>N</b>  | <b>Y<sub>N</sub></b> | <b>σ<sub>N</sub></b> | <b>N</b>    | <b>Y<sub>N</sub></b> | <b>σ<sub>N</sub></b> |
|-----------|----------------------|----------------------|-------------|----------------------|----------------------|
| <b>24</b> | 0.52960              | 1.08640              | <b>70</b>   | 0.55477              | 1.18536              |
| <b>25</b> | 0.53086              | 1.09145              | <b>72</b>   | 0.55520              | 1.18730              |
| <b>26</b> | 0.53200              | 1.09610              | <b>74</b>   | 0.55570              | 1.18900              |
| <b>27</b> | 0.53320              | 1.10040              | <b>76</b>   | 0.55610              | 1.19060              |
| <b>28</b> | 0.53430              | 1.10470              | <b>78</b>   | 0.55650              | 1.19230              |
| <b>29</b> | 0.53530              | 1.10860              | <b>80</b>   | 0.55688              | 1.19382              |
| <b>30</b> | 0.53622              | 1.11238              | <b>82</b>   | 0.55720              | 1.19530              |
| <b>31</b> | 0.53710              | 1.11590              | <b>84</b>   | 0.55760              | 1.19670              |
| <b>32</b> | 0.53800              | 1.11930              | <b>86</b>   | 0.55800              | 1.19800              |
| <b>33</b> | 0.53880              | 1.12260              | <b>88</b>   | 0.55830              | 1.19940              |
| <b>34</b> | 0.53960              | 1.12550              | <b>90</b>   | 0.55860              | 1.20073              |
| <b>35</b> | 0.54034              | 1.12847              | <b>92</b>   | 0.55890              | 1.20200              |
| <b>36</b> | 0.54100              | 1.13130              | <b>94</b>   | 0.55920              | 1.20320              |
| <b>37</b> | 0.54180              | 1.13390              | <b>96</b>   | 0.55950              | 1.20440              |
| <b>38</b> | 0.54240              | 1.13630              | <b>98</b>   | 0.55980              | 1.20550              |
| <b>39</b> | 0.54300              | 1.13880              | <b>100</b>  | 0.56002              | 1.20649              |
| <b>40</b> | 0.54362              | 1.14132              | <b>150</b>  | 0.56461              | 1.22534              |
| <b>41</b> | 0.54420              | 1.14360              | <b>200</b>  | 0.56715              | 1.23598              |
| <b>42</b> | 0.54480              | 1.14580              | <b>250</b>  | 0.56878              | 1.24292              |
| <b>43</b> | 0.54530              | 1.14800              | <b>300</b>  | 0.56993              | 1.24786              |
| <b>44</b> | 0.54580              | 1.14990              | <b>400</b>  | 0.57144              | 1.25450              |
| <b>45</b> | 0.54630              | 1.15185              | <b>500</b>  | 0.57240              | 1.25880              |
| <b>46</b> | 0.54680              | 1.15380              | <b>750</b>  | 0.57377              | 1.26506              |
| <b>47</b> | 0.54730              | 1.15570              | <b>1000</b> | 0.57450              | 1.26851              |
| <b>48</b> | 0.54770              | 1.15740              |             |                      |                      |

*Fuente: Tabla extraída del libro de Máximo Villón 2002*

#### 4.1.3.2 Método de Nash

Nash considera que el valor del caudal máximo para un determinado periodo de retorno se puede calcular a través de la siguiente ecuación:

$$Q_{m\acute{a}x} = a + b \log \log \frac{T}{T - 1} \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

Dónde:

$a, b$  = constantes en función del registro de caudales máximos anuales. Calculados a través de mínimos cuadrados, con la ecuación lineal  $Q = a + bx$ .

$Q_{m\acute{a}x}$  = Caudal máximo para un periodo de retorno determinado.

$T$  = Período de retorno, en años

#### 4.2 Metodologías de Implementación del modelado HEC-RAS

Para la implementación del modelo HEC-RAS para una determinada cuenca, canal o estructura hidráulica, es necesario crear un PROYECTO, el cual está compuesto de una serie de archivos con información y datos asociados a un sistema fluvial, una cuenca o un sector de un canal en particular, se deben seguir los siguientes pasos en forma secuencial:

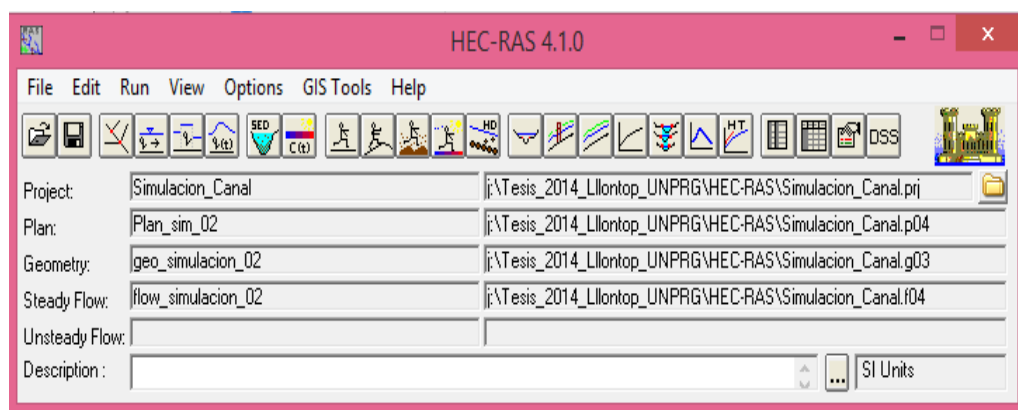
- Iniciar un nuevo proyecto HEC-RAS
- Ingresar lo datos geométricos de la cuenca o canal
- Ingresar datos de flujo y las condiciones iniciales en el modelo hidráulico.
- Ejecutar (correr) la simulación del modelo hidráulico
- Visualizarlos resultados del nivel de agua en las secciones del canal

##### 4.2.1 Iniciar un nuevo proyecto

Una vez iniciado el software HEC-RAS, el usuario o modelador deberá establecer el directorio o carpeta en la cual se realizará la implementación del modelo, se asigna un nombre al nuevo proyecto. En el presente trabajo se elige una carpeta base denominada "TESIS" para guardar todos los archivos relacionados a la

implementación del modelo HEC-RAS para el primer kilómetro del canal alimentador del reservorio Tinajones. Esta carpeta contiene todos los archivos y datos utilizados por HEC-RAS, en nuestro caso el proyecto será denominado “Simulacion\_Canal.prj”, ver Figura 6.

*Figura 6: Menú de inicio del proyecto simulacion\_Canal.prj*



*Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS*

#### **4.2.2 Ingresar los datos geométricos del canal**

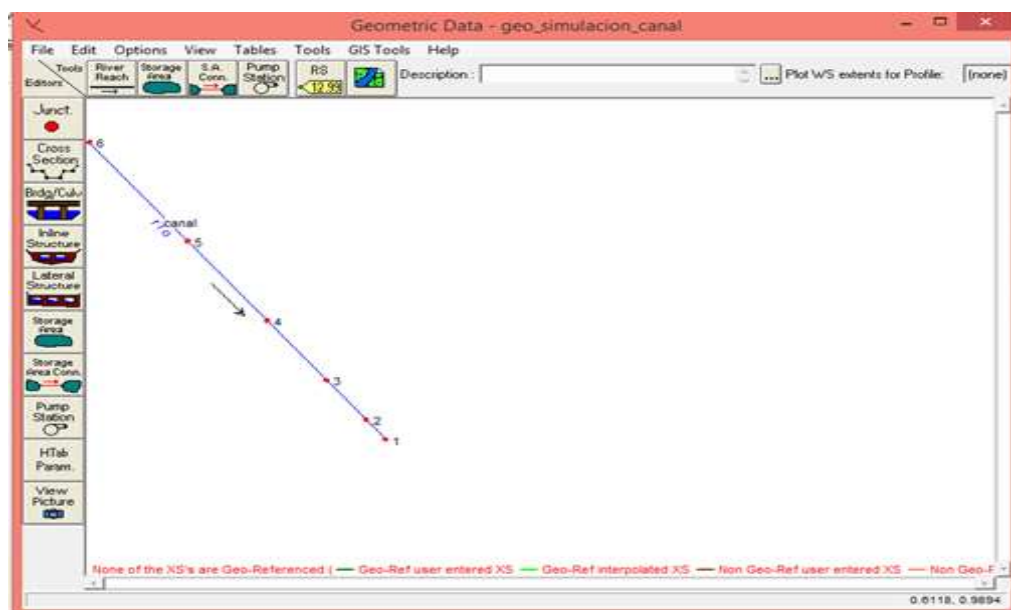
En se definen la forma del canal y las parámetros asociados a las secciones transversales del canal en implementación, en el caso sea necesario se ingresan y definen los datos de estructuras hidráulicas complementarias como puentes, alcantarillas, diques, etc.

Para definir la forma esquemática del sistema fluvial de la determinada cuenca o canal, se debe ir definiendo e ingresando los parámetros de cada sección transversal, iniciando desde la sección más baja hacia la sección más alta, es decir la implementación debe ser desde aguas abajo (en la dirección positiva del flujo).

Para definir la geometría de cada sección transversal del canal, se debe ingresar la ubicación o distancia de cada sección transversal respecto a la primera sección. El software HEC-RAS irá conectando cada tramo de las secciones del canal en forma automática (Figura 7).

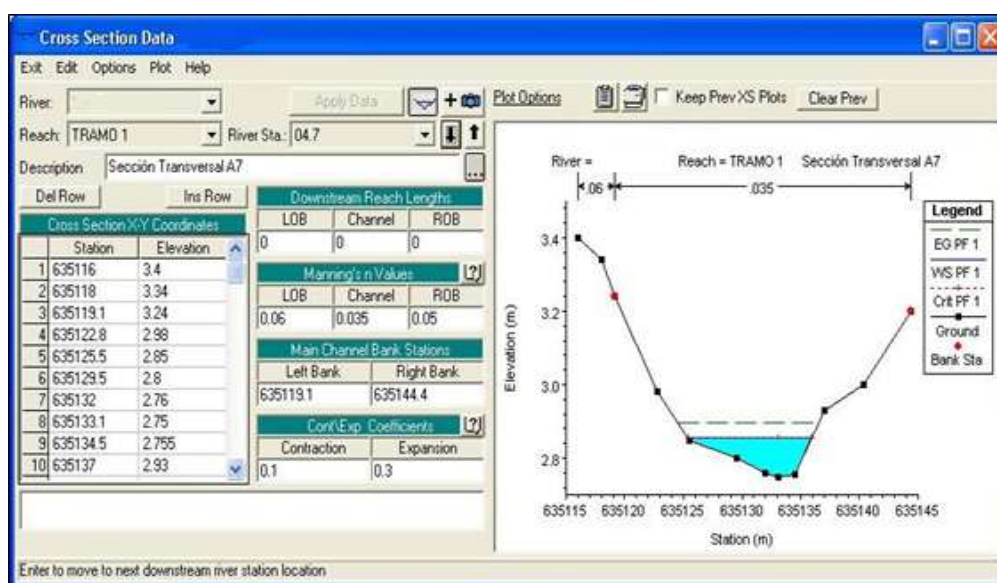
Una vez que todos los datos de las secciones transversales han sido ingresados, el modelador debe guardar el archivo de las secciones transversales con un nombre como “geo\_simulacion” (ver Figura 7) y debe ser guardado en la misma carpeta del proyecto “Simulacion\_Canal.prj”.

Figura 7: Ejemplo de la implementación de las secciones transversales del primer kilómetro del canal



Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS

Figura 8: Ejemplo, definición de parámetros asociados a cada secciones transversales



Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS

#### **4.2.3 Ingresar de los datos del flujo y condiciones iniciales**

Una vez que han sido ingresados los datos geométricos, se procede a ingresar todos los datos de flujo permanente o no permanente. El tipo de dato de flujo a ser ingresado, dependerá del tipo de análisis a ser desarrollado.

En el presente trabajo se analizó la propagación de flujo permanente a través del primer kilómetro del canal. Los datos requeridos para realizar el análisis de flujo permanente son:

- Número de perfiles a ser calculados.
- Datos de caudal a ser evaluados (escenario de evaluación).

Al menos un dato de caudal deberá ser ingresado para un tramo dentro del sistema a modelar.

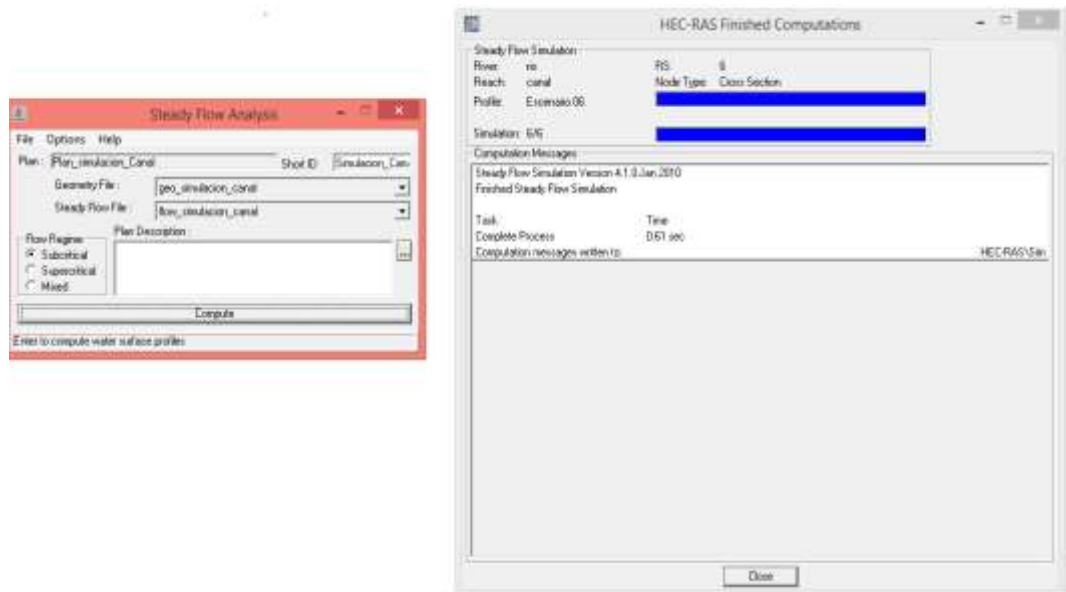
#### **4.2.4 Ejecución de la simulación (cálculos hidráulicos)**

Una vez que han sido ingresados todos los datos geométricos y definidos los escenarios de evaluación se procede a ejecutar la simulación

. Existen tres tipos de cálculos que pueden ser evaluados a través del modelo HEC-RAS: Análisis de Flujo Permanente, Análisis de Flujo No Permanente, y, Funciones de Diseño Hidráulico.

Una vez que se ha establecido qué tipo de análisis, se procede a realizar la ejecución de la simulación del modelo HEC-RAS, el modelo reconoce todos los datos del plan seleccionado, y los escribe en un “run file”, ver Figura 9.

Figura 9: Ejemplo de la ejecución de una simulación HEC-RAS



Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS

#### 4.2.5 Visualización e Impresión de Resultados.

Una vez que el modelo ha finalizado todos los cálculos, es posible visualizar los resultados. Las opciones de visualización que posee la ventana principal del software HEC-RAS incluyen: secciones, perfiles, alturas del nivel de agua, todas ellas en perspectivas X-Y-Z, resúmenes de errores, advertencias y notas.

## **CAPÍTULO V**

### **RESULTADOS**

## 5 RESULTADOS

En este capítulo se muestran en primer lugar los resultados del análisis estadístico de la información de los caudales diarios (1998-2014) y mensuales (1966-1996), a partir de la cual se obtienen los caudales mínimos, promedios, máximos y más frecuentes para cada mes promedio del año, y a través de las metodologías de los periodos de retornos de Nash y Gumbel, se lograron obtener los caudales máximos de periodos de retornos de 10, 20, 50 y 100 años para la cuenca del río Chancay-Lambayeque, válidos para la bocatoma Raca Rumi. En segundo lugar, se muestra la secuencia de la implementación del modelo HEC-RAS, en todas sus etapas para el primer kilómetro del canal alimentador del reservorio de Tinajones, considerando las dimensiones y características propias del tramo del canal alimentador, con sección transversal de forma trapezoidal. Una vez implementado el modelo HEC-RAS se evaluaron seis escenarios de flujo de caudal a través del canal, lográndose obtener las respectivas altura del nivel de agua en el canal.

### ***5.1 Análisis de los caudales y periodos de retorno calculados para la estación hidrológica de la Bocatoma Raca Rumi***

#### **5.1.1 Caudales diarios**

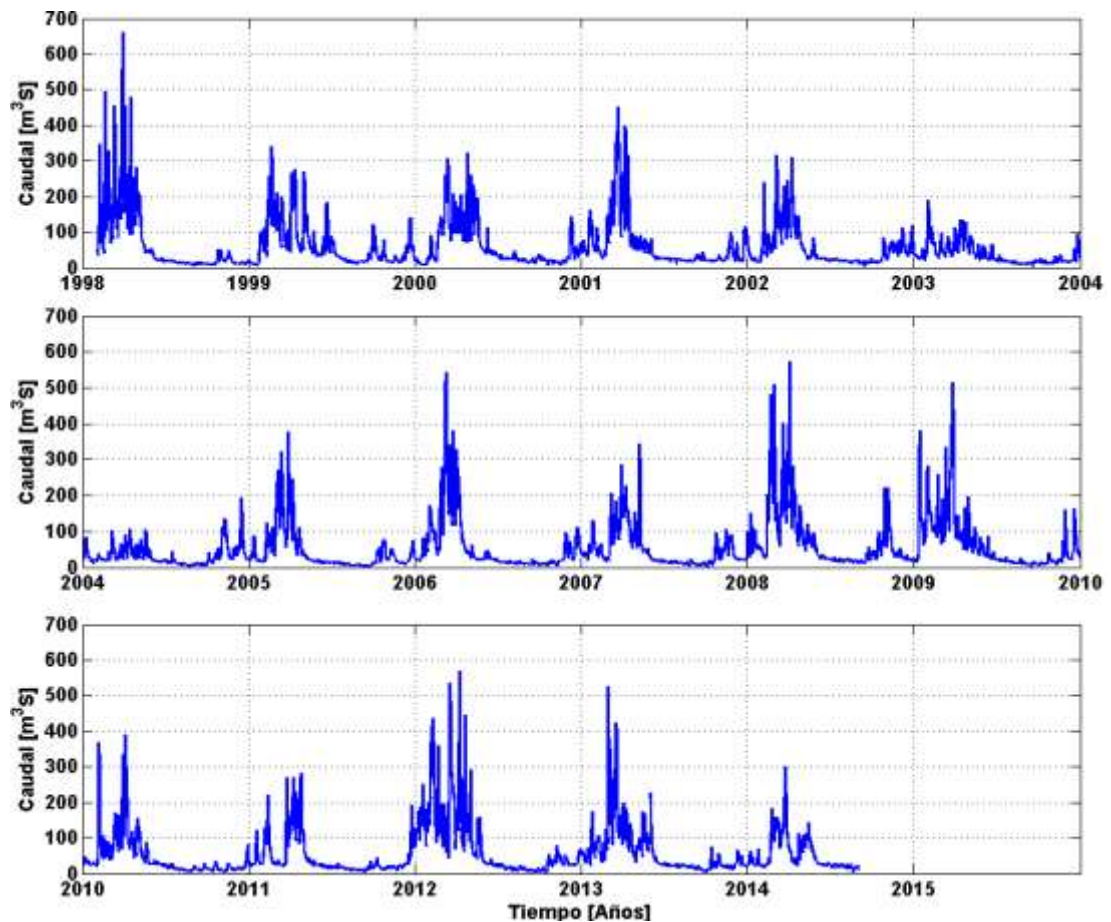
La Figura 10, muestra la información de los caudales diarios registrados en la estación hidrológica de la bocatoma Raca Rumi, para el periodo de tiempo que desde enero del año 1998 hasta octubre del año 2014, en la cual se observa que los caudales diarios presentan un comportamiento cíclico anual, llegándose a registrar los caudales más altos durante los meses de verano y otoño (entre diciembre a mayo de cada año), a este periodo se le conoce como “periodo de mayores avenidas de aguas”, y registrando caudales más bajos durante los meses de invierno y primavera (entre junio a noviembre de cada año).

En general tenemos, que los caudales varían de un año a otro, manteniendo un ciclo anual, con aumento y descenso del caudal. El análisis de los registros diarios



de los caudales, nos permiten determinar que los volúmenes de caudales máximos se presentaron durante los años 1998 ( $Q_{\max} = 662,00 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2001 ( $Q_{\max} = 450,24 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2006 ( $Q_{\max} = 514,39 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2008 ( $Q_{\max} = 572,29 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2009 ( $Q_{\max} = 513,88 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2012 ( $Q_{\max} = 568,16 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y 2013 ( $Q_{\max} = 526,45 \text{ m}^3/\text{s}$ ), los caudales mínimos se presentaron durante los años 2003 ( $Q_{\min} = 188,46 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2004 ( $Q_{\min} = 106,76 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2011 ( $Q_{\min} = 282,94 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y 2014 ( $Q_{\min} = 300,76 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Figura 10: Caudales diarios registrados en la Bocatoma Raca Rumi, periodo 1998 a 2014.

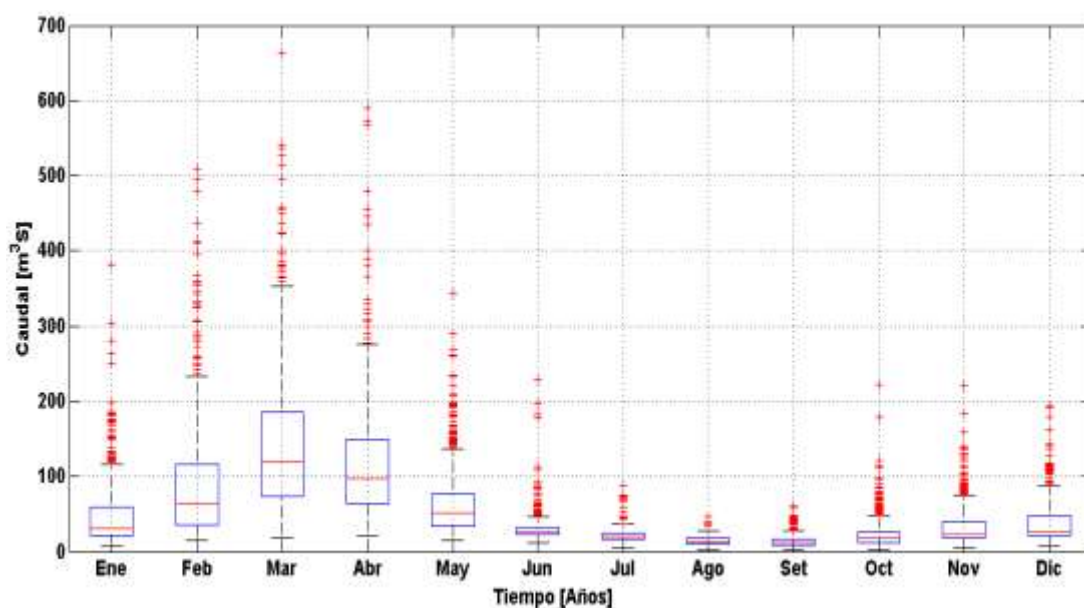


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11, se muestran los diagramas de cajas<sup>3</sup> de los caudales diarios para cada mes del año, a partir de estos diagramas se obtienen los caudales mínimos (límite inferior), promedios (líneas rojas), y máximos (límite superior), así como los caudales atípicos o extremos (asteriscos de color rojo, sobre los límites superiores) para cada mes del año.

El promedio mensual de los caudales diarios muestra un comportamiento cíclico anual, con caudales promedios altos de 51,3 a 119,2 m<sup>3</sup>/s entre los meses de febrero a mayo, y con caudales promedio bajos de aproximadamente 30 m<sup>3</sup>/s, durante los meses de junio a diciembre y enero.

*Figura 11: Histograma de distribución de los caudales diarios registrados durante 1998 a 2014*



*Fuente: Elaboración propia*

<sup>3</sup>Un diagrama de caja es un gráfico, basado en cuartiles, mediante el cual se visualiza un conjunto de datos (en nuestro caso caudales diarios). Está compuesto por un rectángulo, la "caja", y dos brazos, los "bigotes". Es un gráfico que suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q1, Q2 (promedio) y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos.

En la Tabla 3, se muestran los caudales mínimos, promedios, máximos y frecuentes obtenidos a través de los diagramas de cajas. Se tiene que durante los meses de febrero, el caudal varía entre 15,5 a 233,5 m<sup>3</sup>/s, con caudales más frecuente entre 34,8 a 115,6 m<sup>3</sup>/s, los caudales superiores a 233,5 son considerado valores atípicos; durante los meses de marzo, el caudal varía entre 18,5 a 353,5 m<sup>3</sup>/s, con caudales más frecuente entre 73,3 a 185,6 m<sup>3</sup>/s, los caudales superiores a 353,5 son considerado valores atípicos; durante los meses de abril, el caudal varía entre 22,1 a 276,5 m<sup>3</sup>/s, con caudales más frecuente entre 63,3 a 148,7 m<sup>3</sup>/s, los caudales superiores a 276,5 son considerado valores atípicos; durante los meses de mayo, el caudal varía entre 14,5 a 136,0 m<sup>3</sup>/s, con caudales más frecuente entre 34,7 a 76,3 m<sup>3</sup>/s, los caudales superiores a 136,0 son considerado valores atípicos. Los meses de junio a setiembre, presentan un rango de variación relativamente bajo, con caudales mínimos (entre 2,7 y 5,1 m<sup>3</sup>/s) y caudales máximos (entre 27,2 a 47,3 m<sup>3</sup>/s); los mes de octubre a enero, presentan un rango de variación moderado, con caudales mínimos (entre 5,0 y 7,4 m<sup>3</sup>/s) y caudales máximos (entre 75,2 y 115,5 m<sup>3</sup>/s).

*Tabla 3: Estadísticos de los caudales diarios registrados en la bocatoma de Raca Rumi (1998 a 2014)*

| Mes       | Promedio | Desviación Estándar | Límite Inferior | 1 <sup>er</sup> Qrt | 3 <sup>er</sup> Qrt | Límite Superior |
|-----------|----------|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| Enero     | 30.8     | 45.3                | 6.5             | 21.9                | 60.0                | 115.5           |
| Febrero   | 63.4     | 84.9                | 15.5            | 34.8                | 115.6               | 233.5           |
| Marzo     | 119.2    | 101.2               | 18.5            | 73.3                | 185.6               | 353.5           |
| Abril     | 97.8     | 82.1                | 22.1            | 63.3                | 148.7               | 276.5           |
| Mayo      | 51.3     | 45.2                | 14.5            | 34.7                | 76.3                | 136.0           |
| Junio     | 25.9     | 19.8                | 12.0            | 22.2                | 32.3                | 47.3            |
| Julio     | 19.5     | 8.3                 | 5.1             | 15.9                | 24.1                | 36.5            |
| Agosto    | 13.9     | 5.8                 | 2.9             | 10.6                | 18.4                | 27.2            |
| Setiembre | 12.3     | 7.9                 | 2.5             | 9.3                 | 16.9                | 28.5            |
| Octubre   | 18.6     | 21.3                | 2.7             | 12.5                | 26.9                | 48.2            |
| Noviembre | 22.1     | 27.3                | 5.0             | 17.4                | 40.6                | 75.2            |
| Diciembre | 26.6     | 29.3                | 7.4             | 20.9                | 48.1                | 88.3            |

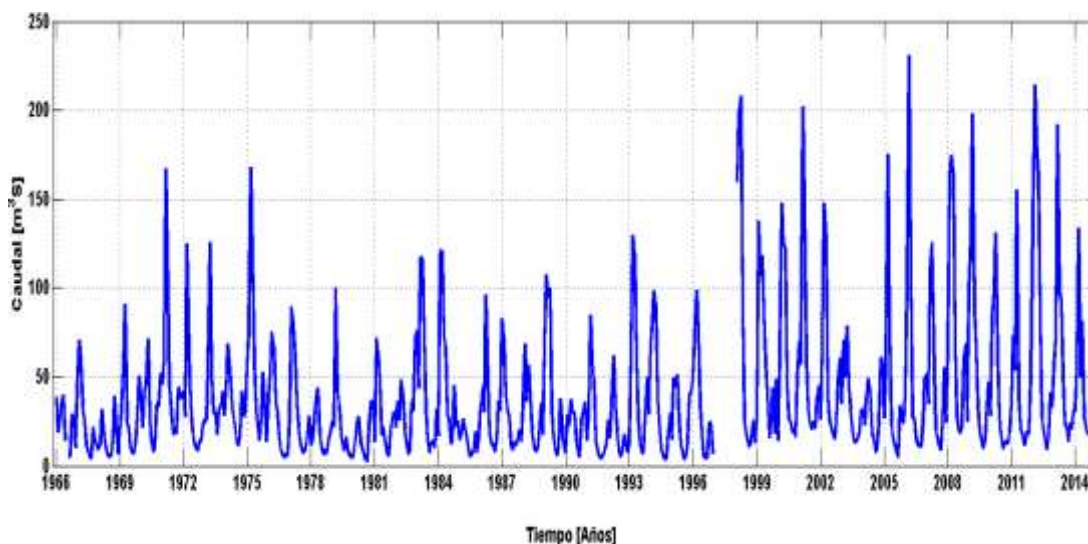
*Fuente: Elaboración propia*

### 5.1.2 Caudales promedios mensuales

La Figura 12, muestra la información de los caudales promedios mensuales registrados en la estación hidrológica de la bocatoma Raca Rumi, para el periodo de los años de 1966 a 2014 (aproximadamente 50 años de registro de información), observándose un marcado ciclo anual, con registros de caudales promedios bajos (entre los años 1966 a 1970 y 1976 a 1981), moderados (entre los años 1982 a 1996) y altos (entre los años 1972 a 1975 y 1998 a 2014).

En particular, tenemos que se registraron caudales altos durante los años 1983 ( $Q_{promm\acute{a}x} = 783,80 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 1998 ( $Q_{promm\acute{a}x} = 662,00 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2001 ( $Q_{promm\acute{a}x} = 450,24 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2005 ( $Q_{promm\acute{a}x} = 376,52 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2006 ( $Q_{promm\acute{a}x} = 541,39 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2008 ( $Q_{promm\acute{a}x} = 572,29 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2009 ( $Q_{promm\acute{a}x} = 513,88 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2010 ( $Q_{promm\acute{a}x} = 389,30 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2012 ( $Q_{promm\acute{a}x} = 568,16 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y 2013 ( $Q_{promm\acute{a}x} = 526,45 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

*Figura 12: Caudales promedios mensuales registrados en la Bocatoma Raca Rumi, periodo 1966 a 2014*



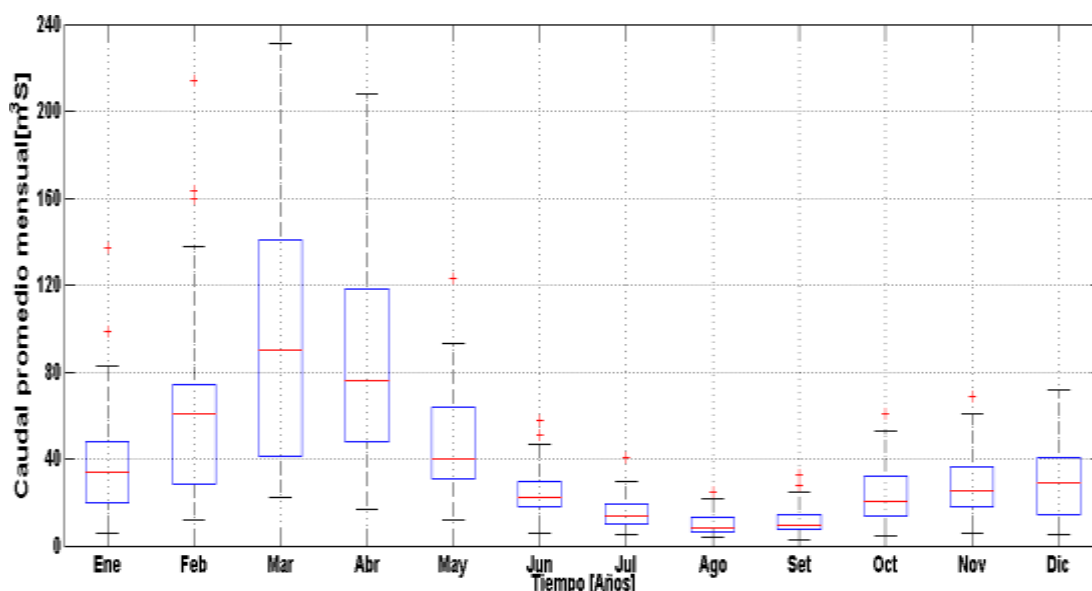
*Fuente: Elaboración propia*

La Figura 13, se muestran los diagramas de cajas de los caudales promedio mensuales por cada mes del año, a partir de estos diagramas se obtienen los

caudales mínimos (límite inferior), promedios (líneas rojas), y máximos (límite superior), así como los caudales atípicos o extremos (asteriscos de color rojo, sobre los límites superiores) para cada mes del año.

El promedio mensual de los caudales muestra, caudales promedios altos de 33,7 a 90,1 m<sup>3</sup>/s entre los meses de enero a mayo, y caudales promedio bajos entre 8,4 a 29,2 m<sup>3</sup>/s, durante los meses de junio a diciembre.

*Figura 13: Histograma de distribución de los caudales mensuales registrados durante 1966 a 2014*



*Fuente: Elaboración propia*

En la Tabla 4, se muestran los caudales mínimos, promedio, máximos y frecuenten obtenidos a través de los diagramas de cajas. Se tiene que durante los meses de enero, el caudal varía entre 5,6 a 83,0 m<sup>3</sup>/s, con caudales más frecuente entre 5,6 a 48,0 m<sup>3</sup>/s, los caudales superiores a 83,0 son considerado valores atípicos; durante los meses de febrero, el caudal varía entre 12,1 a 137,8 m<sup>3</sup>/s, con caudales más frecuente entre 28,2 a 74,2 m<sup>3</sup>/s, los caudales superiores a 137,8 son considerados valores atípicos; durante los meses de marzo, el caudal varía entre 22,5 a 231,1 m<sup>3</sup>/s, con caudales más frecuente entre 41,3 a 140,6 m<sup>3</sup>/s, los caudales

superiores a 231,1 son considerados valores atípicos; durante los meses de abril, el caudal varía entre 16,9 a 207,9 m<sup>3</sup>/s, con caudales más frecuente entre 48,2 a 118,1 m<sup>3</sup>/s, los caudales superiores a 207,9 son considerados valores atípicos; durante los meses de mayo, el caudal varía entre 11,7 a 93,3 m<sup>3</sup>/s, con caudales más frecuente entre 30,6 a 63,9 m<sup>3</sup>/s, los caudales superiores a 93,3 son considerados valores atípicos. Los meses de junio a diciembre, presentan un rango de variación relativamente bajo, con caudales mínimos (entre 2,7 y 17,8 m<sup>3</sup>/s) y caudales máximos (entre 21,8 a 72,0 m<sup>3</sup>/s).

*Tabla 4: Estadísticos de los caudales promedios mensuales registrados en la bocatoma de Raca Rumi, periodo 1966 a 2014*

| Mes       | Promedio | Desviación Estándar | Límite Inferior | 1 <sup>er</sup> Qrt | 3 <sup>er</sup> Qrt | Límite Superior |
|-----------|----------|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| Enero     | 33.7     | 25.9                | 5.6             | 20.1                | 48                  | 83.0            |
| Febrero   | 61       | 43.4                | 12.1            | 28.2                | 74.2                | 137.8           |
| Marzo     | 90.1     | 60.3                | 22.5            | 41.3                | 140.6               | 231.1           |
| Abril     | 76.3     | 44                  | 16.9            | 48.2                | 118.1               | 207.9           |
| Mayo      | 39.9     | 23.8                | 11.7            | 30.6                | 63.9                | 93.3            |
| Junio     | 22       | 10.1                | 6.0             | 17.8                | 29.4                | 46.7            |
| Julio     | 13.5     | 7.1                 | 5.1             | 10.3                | 19.5                | 29.8            |
| Agosto    | 8.4      | 5.2                 | 3.9             | 6.6                 | 13                  | 21.8            |
| Setiembre | 9.6      | 6.6                 | 2.7             | 7.6                 | 14.4                | 24.7            |
| Octubre   | 20.2     | 13                  | 4.7             | 14                  | 32                  | 52.6            |
| Noviembre | 25.2     | 14.2                | 5.8             | 17.7                | 36.1                | 60.9            |
| Diciembre | 29.2     | 16.4                | 4.9             | 14.5                | 40.9                | 72.0            |

*Fuente: Elaboración propia*

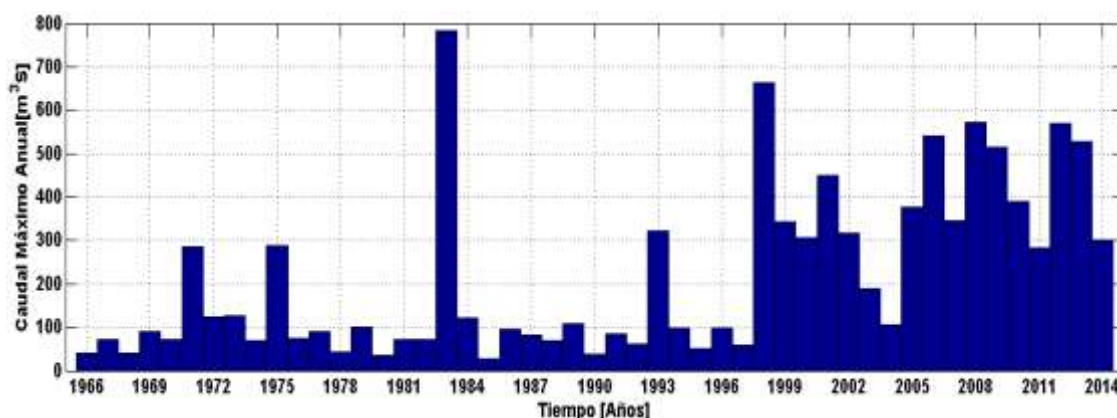
### 5.1.3 Caudales máximos anuales

La información del caudal máximo, corresponde a la descarga máxima instantáneo registrado en la estación hidrológica de la bocatoma Raca Rumi, registrados desde el año 1966 hasta el año 2014.

La Figura 14, muestra los caudales máximos anuales desde 1966 al 2014, presentando un caudal mínimo de 26,4 m<sup>3</sup>/s en el año 1985 y un caudal máximo de 783,8 m<sup>3</sup>/s en el año 1983 (coincide con un año de condiciones El Niño (denominado,

El Niño 1982-1983)), adicionalmente se tiene registro de un caudal máximo de 668,0 m<sup>3</sup>/s para el año 1998. Durante los años 1966 a 1982, y 1984 a 2004 se registraron caudales máximos que llegaron a alcanzar valores moderados de alrededor 100 m<sup>3</sup>/s, a excepción de los años 1993 y 2002, que registraron caudales máximos de 322.2 y 376.5 m<sup>3</sup>/s, correspondientemente, y del año 1998, que registro un caudal máximo muy alto de 668.0 m<sup>3</sup>/s; a partir de los años 2005 a 2014, se vienen presentando consecutivamente caudales máximos altos, entre 344 y 572 m<sup>3</sup>/s.

*Figura 14: Caudales promedio máximos anuales, registrados en la bocatoma Raca Rumi, durante los años 1966 al 2014*

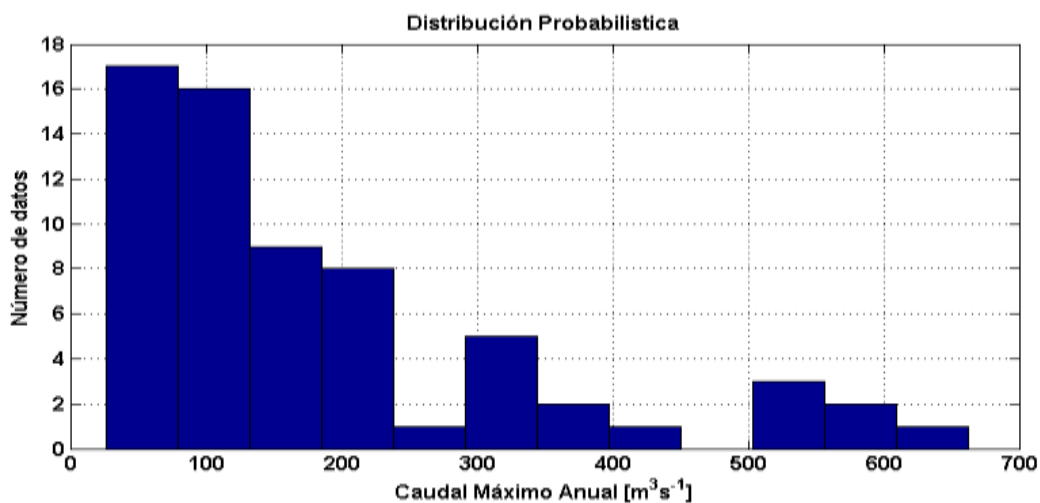


*Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 15, se muestra la distribución probabilística de los caudales promedios maximos anuales, se observa que presenta una mayor cantidad de registros (33 datos) con valores menores a 120 m<sup>3</sup>/s, seguido de 17 registros que varían entre 120 a 250 m<sup>3</sup>/s, se observa que la cantidad de registros disminuye a medida que incrementan los caudales. Esta función de distribución muestra que los valores más altos de caudales son poco frecuentes y serían equivalente a los valores extremos o caudales de máximas de periodos de retorno alto.



Figura 15: Distribución probabilística de los caudales promedios máximos anuales



Fuente: Elaboración propia

#### 5.1.3.1 Cálculo de periodo de retornos de caudales máximos por método empírico

- 1) Se ordenan los caudales máximos anuales en forma descendente, Tabla 5
- 2) Preliminarmente se calculan las columnas del
  - a. número de orden (m)
  - b. caudales máximos ordenados en forma descendente,
  - c. Cociente de  $m / (N+1)$
  - d. Cociente de  $1 - (m / (N+1))$
  - e. Probabilidad porcentual de retorno =  $100 \cdot (1 - (m/N+1))$
- 3) Ahora graficamos en el papel probabilístico los caudales máximos vs la probabilidad de retorno. Figura 16.



**Tabla 5: Cálculo de periodos de retorno de los caudales máximos con el método empírico (Caudales Máximos Anuales vs Distribución Probabilística)**

| Caudales Máximos Anuales |              | Distribución Probabilística de Caudales Máximos |    |         |             |                   |
|--------------------------|--------------|---|----|---------|-------------|-------------------|
| Años                     | Qmax Anuales | Qmax  | m  | m/(N+1) | 1 - (m/N+1) | 100*(1 - (m/N+1)) |
| 1966                     | 39.62        | 783.80  | 1  | 0.02    | 0.98        | 98                |
| 1967                     | 70.88        | 662.00  | 2  | 0.04    | 0.96        | 96                |
| 1968                     | 39.12        | 572.29  | 3  | 0.06    | 0.94        | 94                |
| 1969                     | 91.14        | 568.16  | 4  | 0.08    | 0.92        | 92                |
| 1970                     | 71.33        | 541.39  | 5  | 0.1     | 0.9         | 90                |
| 1971                     | 284.75       | 526.45  | 6  | 0.12    | 0.88        | 88                |
| 1972                     | 125.05       | 513.88  | 7  | 0.14    | 0.86        | 86                |
| 1973                     | 125.99       | 450.24  | 8  | 0.16    | 0.84        | 84                |
| 1974                     | 68.74        | 389.30  | 9  | 0.18    | 0.82        | 82                |
| 1975                     | 289.24       | 376.52  | 10 | 0.2     | 0.8         | 80                |
| 1976                     | 75.10        | 344.16  | 11 | 0.22    | 0.78        | 78                |
| 1977                     | 89.27        | 341.64  | 12 | 0.24    | 0.76        | 76                |
| 1978                     | 43.75        | 322.23  | 13 | 0.26    | 0.74        | 74                |
| 1979                     | 99.94        | 315.72  | 14 | 0.28    | 0.72        | 72                |
| 1980                     | 36.44        | 307.10  | 15 | 0.3     | 0.7         | 70                |
| 1981                     | 72.01        | 300.76  | 16 | 0.32    | 0.68        | 68                |
| 1982                     | 72.03        | 289.24  | 17 | 0.34    | 0.66        | 66                |
| 1983                     | 783.80       | 284.75  | 18 | 0.36    | 0.64        | 64                |
| 1984                     | 121.17       | 282.94  | 19 | 0.38    | 0.62        | 62                |
| 1985                     | 26.41        | 188.46  | 20 | 0.4     | 0.6         | 60                |
| 1986                     | 95.91        | 125.99  | 21 | 0.42    | 0.58        | 58                |
| 1987                     | 82.97        | 125.05  | 22 | 0.44    | 0.56        | 56                |
| 1988                     | 68.41        | 121.17  | 23 | 0.46    | 0.54        | 54                |
| 1989                     | 107.57       | 107.57  | 24 | 0.48    | 0.52        | 52                |
| 1990                     | 37.39        | 106.76  | 25 | 0.5     | 0.5         | 50                |
| 1991                     | 85.02        | 99.94   | 26 | 0.52    | 0.48        | 48                |
| 1992                     | 61.70        | 98.66   | 27 | 0.54    | 0.46        | 46                |
| 1993                     | 322.23       | 98.49   | 28 | 0.56    | 0.44        | 44                |
| 1994                     | 98.49        | 95.91   | 29 | 0.58    | 0.42        | 42                |
| 1995                     | 51.46        | 91.14   | 30 | 0.6     | 0.4         | 40                |
| 1996                     | 98.66        | 89.27   | 31 | 0.62    | 0.38        | 38                |
| 1997                     | 58.14        | 85.02   | 32 | 0.64    | 0.36        | 36                |
| 1998                     | 662.00       | 82.97   | 33 | 0.66    | 0.34        | 34                |
| 1999                     | 341.64       | 75.10   | 34 | 0.68    | 0.32        | 32                |
| 2000                     | 307.10       | 72.03   | 35 | 0.7     | 0.3         | 30                |
| 2001                     | 450.24       | 72.01   | 36 | 0.72    | 0.28        | 28                |
| 2002                     | 315.72       | 71.33   | 37 | 0.74    | 0.26        | 26                |

| Caudales Máximos Anuales |              |
|--------------------------|--------------|
| Años                     | Qmax Anuales |
| 1966                     | 39.62        |
| 1967                     | 70.88        |
| 1968                     | 39.12        |
| 1969                     | 91.14        |
| 1970                     | 71.33        |
| 1971                     | 284.75       |
| 1972                     | 125.05       |
| 1973                     | 125.99       |
| 1974                     | 68.74        |
| 1975                     | 289.24       |
| 1976                     | 75.10        |
| 1977                     | 89.27        |
| 1978                     | 43.75        |
| 1979                     | 99.94        |
| 1980                     | 36.44        |
| 1981                     | 72.01        |
| 1982                     | 72.03        |
| 1983                     | 783.80       |
| 1984                     | 121.17       |
| 1985                     | 26.41        |
| 1986                     | 95.91        |
| 1987                     | 82.97        |
| 1988                     | 68.41        |
| 1989                     | 107.57       |
| 1990                     | 37.39        |
| 1991                     | 85.02        |
| 1992                     | 61.70        |
| 1993                     | 322.23       |
| 1994                     | 98.49        |
| 1995                     | 51.46        |
| 1996                     | 98.66        |
| 2003                     | 188.46       |
| 2004                     | 106.76       |
| 2005                     | 376.52       |
| 2006                     | 541.39       |
| 2007                     | 344.16       |
| 2008                     | 572.29       |
| 2009                     | 513.88       |
| 2010                     | 389.30       |
| 2011                     | 282.94       |

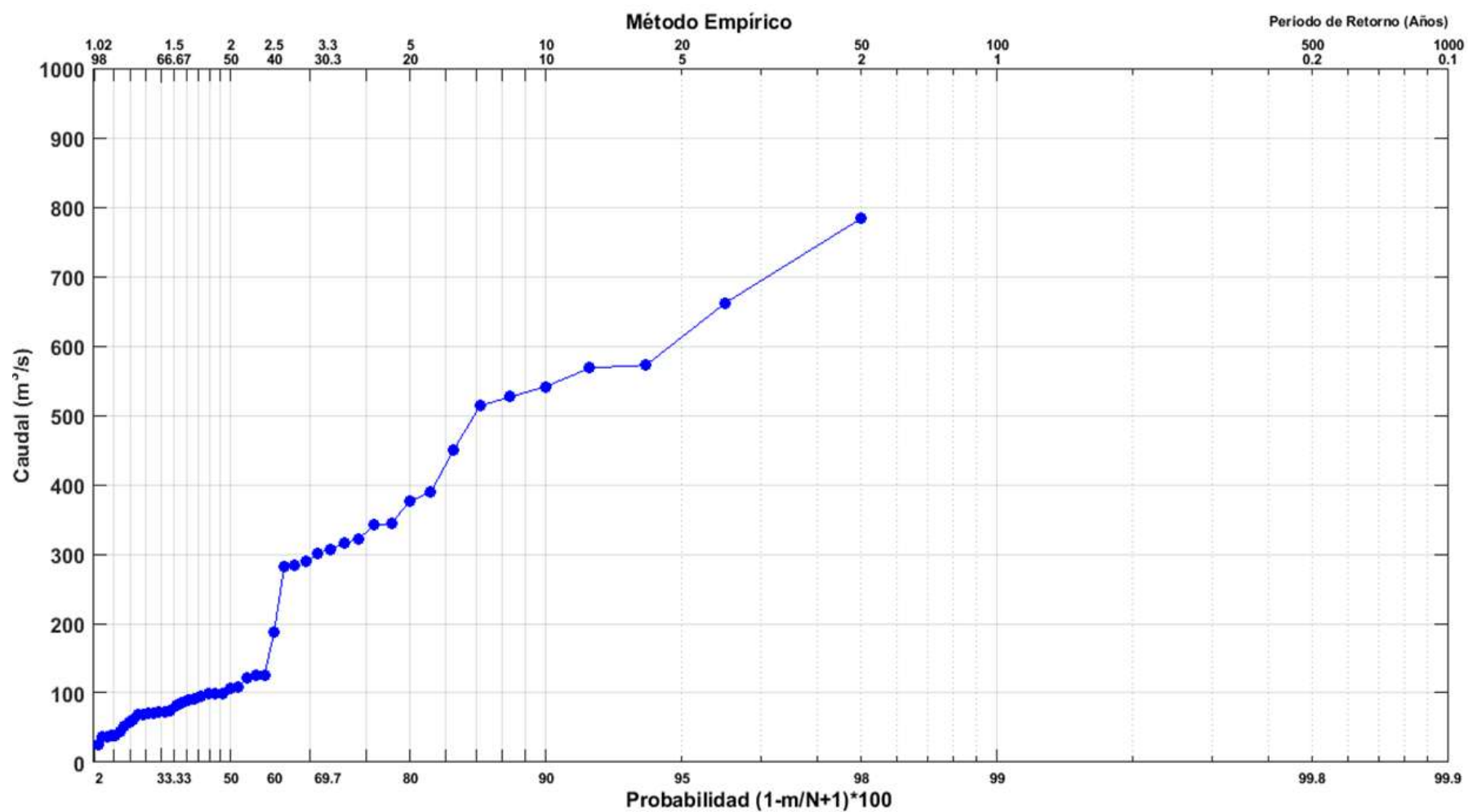
| Distribución Probabilística de Caudales Máximos |    |           |               |                     |
|---|----|-----------|---------------|---------------------|
| Qmax  | m  | $m/(N+1)$ | $1 - (m/N+1)$ | $100*(1 - (m/N+1))$ |
| 783.80  | 1  | 0.02      | 0.98          | 98                  |
| 662.00  | 2  | 0.04      | 0.96          | 96                  |
| 572.29  | 3  | 0.06      | 0.94          | 94                  |
| 568.16  | 4  | 0.08      | 0.92          | 92                  |
| 541.39  | 5  | 0.1       | 0.9           | 90                  |
| 526.45  | 6  | 0.12      | 0.88          | 88                  |
| 513.88  | 7  | 0.14      | 0.86          | 86                  |
| 450.24  | 8  | 0.16      | 0.84          | 84                  |
| 389.30  | 9  | 0.18      | 0.82          | 82                  |
| 376.52  | 10 | 0.2       | 0.8           | 80                  |
| 344.16  | 11 | 0.22      | 0.78          | 78                  |
| 341.64  | 12 | 0.24      | 0.76          | 76                  |
| 322.23  | 13 | 0.26      | 0.74          | 74                  |
| 315.72  | 14 | 0.28      | 0.72          | 72                  |
| 307.10  | 15 | 0.3       | 0.7           | 70                  |
| 300.76  | 16 | 0.32      | 0.68          | 68                  |
| 289.24  | 17 | 0.34      | 0.66          | 66                  |
| 284.75  | 18 | 0.36      | 0.64          | 64                  |
| 282.94  | 19 | 0.38      | 0.62          | 62                  |
| 188.46  | 20 | 0.4       | 0.6           | 60                  |
| 125.99  | 21 | 0.42      | 0.58          | 58                  |
| 125.05  | 22 | 0.44      | 0.56          | 56                  |
| 121.17  | 23 | 0.46      | 0.54          | 54                  |
| 107.57  | 24 | 0.48      | 0.52          | 52                  |
| 106.76  | 25 | 0.5       | 0.5           | 50                  |
| 99.94   | 26 | 0.52      | 0.48          | 48                  |
| 98.66   | 27 | 0.54      | 0.46          | 46                  |
| 98.49   | 28 | 0.56      | 0.44          | 44                  |
| 95.91   | 29 | 0.58      | 0.42          | 42                  |
| 91.14   | 30 | 0.6       | 0.4           | 40                  |
| 89.27   | 31 | 0.62      | 0.38          | 38                  |
| 70.88   | 38 | 0.76      | 0.24          | 24                  |
| 68.74   | 39 | 0.78      | 0.22          | 22                  |
| 68.41   | 40 | 0.8       | 0.2           | 20                  |
| 61.70   | 41 | 0.82      | 0.18          | 18                  |
| 58.14   | 42 | 0.84      | 0.16          | 16                  |
| 51.46   | 43 | 0.86      | 0.14          | 14                  |
| 43.75   | 44 | 0.88      | 0.12          | 12                  |
| 39.62   | 45 | 0.9       | 0.1           | 10                  |
| 39.12   | 46 | 0.92      | 0.08          | 8                   |

| Caudales Máximos Anuales |              |
|--------------------------|--------------|
| Años                     | Qmax Anuales |
| 1966                     | 39.62        |
| 1967                     | 70.88        |
| 1968                     | 39.12        |
| 1969                     | 91.14        |
| 1970                     | 71.33        |
| 1971                     | 284.75       |
| 1972                     | 125.05       |
| 1973                     | 125.99       |
| 1974                     | 68.74        |
| 1975                     | 289.24       |
| 1976                     | 75.10        |
| 1977                     | 89.27        |
| 1978                     | 43.75        |
| 1979                     | 99.94        |
| 1980                     | 36.44        |
| 1981                     | 72.01        |
| 1982                     | 72.03        |
| 1983                     | 783.80       |
| 1984                     | 121.17       |
| 1985                     | 26.41        |
| 1986                     | 95.91        |
| 1987                     | 82.97        |
| 1988                     | 68.41        |
| 1989                     | 107.57       |
| 1990                     | 37.39        |
| 1991                     | 85.02        |
| 1992                     | 61.70        |
| 1993                     | 322.23       |
| 1994                     | 98.49        |
| 1995                     | 51.46        |
| 1996                     | 98.66        |
| 2012                     | 568.16       |
| 2013                     | 526.45       |
| 2014                     | 300.76       |

| Distribución Probabilística de Caudales Máximos |    |           |               |                     |
|---|----|-----------|---------------|---------------------|
| Qmax  | m  | $m/(N+1)$ | $1 - (m/N+1)$ | $100*(1 - (m/N+1))$ |
| 783.80  | 1  | 0.02      | 0.98          | 98                  |
| 662.00  | 2  | 0.04      | 0.96          | 96                  |
| 572.29  | 3  | 0.06      | 0.94          | 94                  |
| 568.16  | 4  | 0.08      | 0.92          | 92                  |
| 541.39  | 5  | 0.1       | 0.9           | 90                  |
| 526.45  | 6  | 0.12      | 0.88          | 88                  |
| 513.88  | 7  | 0.14      | 0.86          | 86                  |
| 450.24  | 8  | 0.16      | 0.84          | 84                  |
| 389.30  | 9  | 0.18      | 0.82          | 82                  |
| 376.52  | 10 | 0.2       | 0.8           | 80                  |
| 344.16  | 11 | 0.22      | 0.78          | 78                  |
| 341.64  | 12 | 0.24      | 0.76          | 76                  |
| 322.23  | 13 | 0.26      | 0.74          | 74                  |
| 315.72  | 14 | 0.28      | 0.72          | 72                  |
| 307.10  | 15 | 0.3       | 0.7           | 70                  |
| 300.76  | 16 | 0.32      | 0.68          | 68                  |
| 289.24  | 17 | 0.34      | 0.66          | 66                  |
| 284.75  | 18 | 0.36      | 0.64          | 64                  |
| 282.94  | 19 | 0.38      | 0.62          | 62                  |
| 188.46  | 20 | 0.4       | 0.6           | 60                  |
| 125.99  | 21 | 0.42      | 0.58          | 58                  |
| 125.05  | 22 | 0.44      | 0.56          | 56                  |
| 121.17  | 23 | 0.46      | 0.54          | 54                  |
| 107.57  | 24 | 0.48      | 0.52          | 52                  |
| 106.76  | 25 | 0.5       | 0.5           | 50                  |
| 99.94   | 26 | 0.52      | 0.48          | 48                  |
| 98.66   | 27 | 0.54      | 0.46          | 46                  |
| 98.49   | 28 | 0.56      | 0.44          | 44                  |
| 95.91   | 29 | 0.58      | 0.42          | 42                  |
| 91.14   | 30 | 0.6       | 0.4           | 40                  |
| 89.27   | 31 | 0.62      | 0.38          | 38                  |
| 37.39   | 47 | 0.94      | 0.06          | 6                   |
| 36.44   | 48 | 0.96      | 0.04          | 4                   |
| 26.41   | 49 | 0.98      | 0.02          | 2                   |

Fuente: Elaboración propia

Figura 16: Periodos de retornos de Caudales máximos, calculados por el método empírico para la estación hidrológica Bocatoma Raca Rumi, 1966 – 2014



Fuente: Elaboración propia

### 5.1.3.2 Cálculo de periodo de retornos de caudales máximos por método Gumbel

Se siguió el siguiente procedimiento:

1) Cálculo del promedio de los caudales máximos, en la Tabla 6 se muestra el promedio de los  $Q_{max} = 215,95 \text{ m}^3/\text{s}$ .

2) Cálculo de la desviación estándar de los  $Q_{max}$ , en la Tabla 6 se muestra la desviación estándar de los  $Q_{max}$ ,  $\sigma_Q = 196,00 \text{ m}^3/\text{s}$ .

3) Cálculo de los coeficientes  $\sigma_N$  y  $\bar{Y}_N$ , estos valores son obtenidos de la Tabla 2, que en este caso para  $N = 49$ , es igual a :  $\sigma_N = 1,1590$  y  $\bar{Y}_N = 0,5481$

4) Reemplazando los valores de 1, 2 y 3 en la ecuación de periodos de retorno de caudales máximos de Gumbel, tenemos la siguiente expresión:

$$Q_{max} = 215,95 - \frac{196,00}{1,1590} (0,548 - \ln T)$$

$$Q_{max} = 123,2592 + 169,1099 * \ln T$$

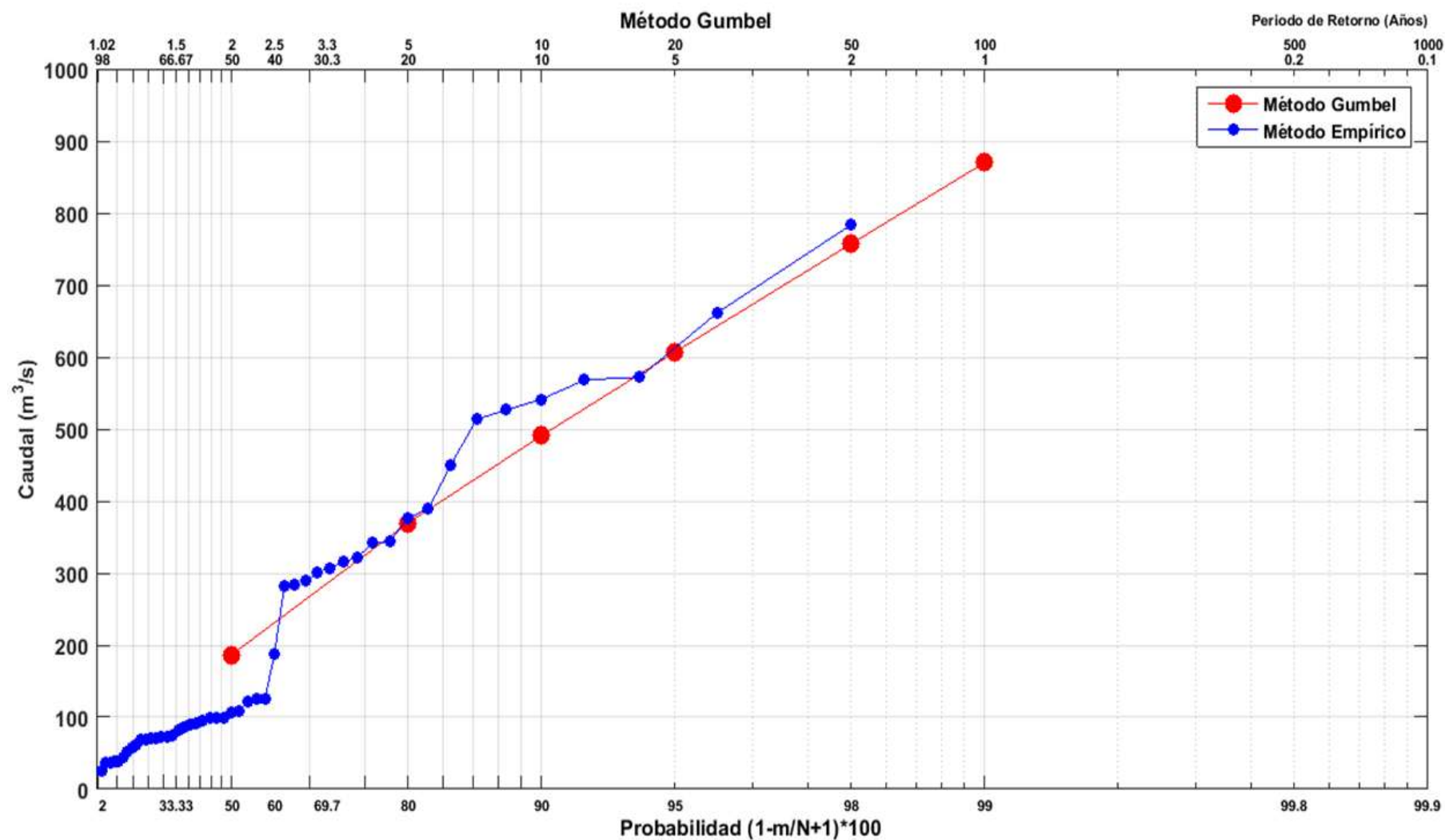
5) Ahora calculamos los caudales máximos de retorno para diversos valores de  $T = 2, 5, 10, 20, 50$  y  $100$  años. Los resultados se muestran en la Tabla 8

Tabla 6: Caudales máximos para cálculo de periodos de retornos por el método de Gumbel

| Método de Gumbel    |        |        |      |        |
|---------------------|--------|--------|------|--------|
| Año                 | Qmax   |        | Año  | Qmax   |
| 1966                | 39.62  |        | 1991 | 85.02  |
| 1967                | 70.88  |        | 1992 | 61.70  |
| 1968                | 39.12  |        | 1993 | 322.23 |
| 1969                | 91.14  |        | 1994 | 98.49  |
| 1970                | 71.33  |        | 1995 | 51.46  |
| 1971                | 284.75 |        | 1996 | 98.66  |
| 1972                | 125.05 |        | 1997 | 58.14  |
| 1973                | 125.99 |        | 1998 | 662.00 |
| 1974                | 68.74  |        | 1999 | 341.64 |
| 1975                | 289.24 |        | 2000 | 307.10 |
| 1976                | 75.10  |        | 2001 | 450.24 |
| 1977                | 89.27  |        | 2002 | 315.72 |
| 1978                | 43.75  |        | 2003 | 188.46 |
| 1979                | 99.94  |        | 2004 | 106.76 |
| 1980                | 36.44  |        | 2005 | 376.52 |
| 1981                | 72.01  |        | 2006 | 541.39 |
| 1982                | 72.03  |        | 2007 | 344.16 |
| 1983                | 783.80 |        | 2008 | 572.29 |
| 1984                | 121.17 |        | 2009 | 513.88 |
| 1985                | 26.41  |        | 2010 | 389.30 |
| 1986                | 95.91  |        | 2011 | 282.94 |
| 1987                | 82.97  |        | 2012 | 568.16 |
| 1988                | 68.41  |        | 2013 | 526.45 |
| 1989                | 107.57 |        | 2014 | 300.76 |
| 1990                | 37.39  |        | 2015 | ---    |
| Promedio            |        | 215.95 |      |        |
| Desviación Estándar |        | 196.00 |      |        |

Fuente: Elaboración propia

Figura 17: Periodos de retornos de Caudales máximos, calculados por el método Gumbel para la estación hidrológica Bocatoma Raca Rumi, 1966 – 2014



Fuente: Elaboración propia

### 5.1.3.3 Cálculo de periodo de retornos de caudales máximos por método Nash

Se siguió el siguiente procedimiento:

1) Se ordenan los caudales máximos anuales en forma descendente, Tabla 7

2) Preliminarmente se calculan las columnas del

a. número de orden,

b. caudales máximos ordenados en forma descendente,

c. periodos de retornos T

d. Cociente de T / (T-1)

e.  $X = \log \log (T/(T-1))$

f. Producto de Q \* X

$$\sum Q = 10581,470$$

$$\sum Q^2 = 4128988,039$$

$$\sum X = -2,413$$

$$\sum X^2 = 30,070$$

$$\sum Q * X = -10965,757$$

3) Cálculo de  $Q_m$  y  $X_m$ ,

$$Q_m = \frac{10581,470}{49} = 215,95 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$X_m = \frac{-2,413}{49} = -0,6$$

4) Ahora calculamos los parámetros a y b de la ecuación de Nash

$$b = \frac{-10965,757 + 49 * 0,6 * 215,95}{30,070 - 49 * 0,36} = -371,6646$$

$$a = 215,95 - 371,6646 * 0,6 = -7,1480$$

5) Ahora sustituimos los valores de a y b en la ecuación de caudales máximos.



$$Q_{m\acute{a}x} = a + b \log \log \frac{T}{T - 1}$$

$$Q_{m\acute{a}x} = -7,1480 - 371,6646 * \log \log \frac{T}{T - 1}$$

6) Ahora calculamos los caudales máximos de retorno para diversos valores de T = 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Los resultados se muestran en la Tabla 8

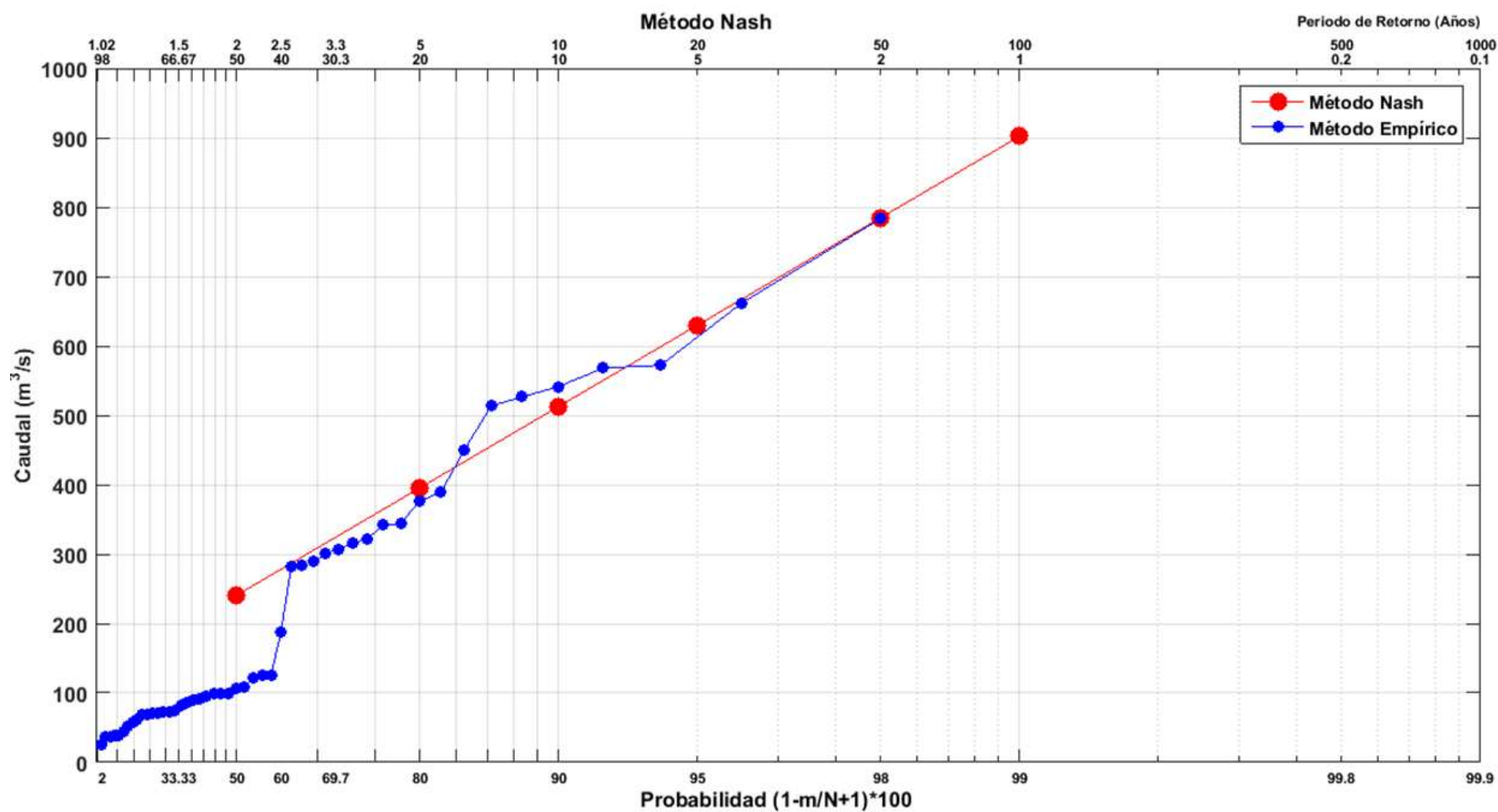
Tabla 7: Caudales máximos para cálculo de periodos de retornos por el método de Nash

| Cálculo de los Periodos de Retorno de los Caudales Máximos por el Método de Nash |         |    |          |               |             |                           |           |             |            |
|--|---------|----|----------|---------------|-------------|---------------------------|-----------|-------------|------------|
| Años   | Qmax    | m  | Qmax (>) | $T = (N+1)/m$ | $T / (T-1)$ | $X = \log \log (T/(T-1))$ | $Q * X$   | $Q^2$       | $X^2$      |
| 1966   | 39.617  | 1  | 783.8    | 50.000        | 1.020       | -2.057                    | -1612.120 | 614342.44   | 4.23042624 |
| 1967   | 70.876  | 2  | 662      | 25.000        | 1.042       | -1.751                    | -1159.361 | 438244      | 3.06705169 |
| 1968   | 39.115  | 3  | 572.29   | 16.667        | 1.064       | -1.571                    | -898.896  | 327515.8441 | 2.46709849 |
| 1969   | 91.143  | 4  | 568.156  | 12.500        | 1.087       | -1.441                    | -818.770  | 322801.2403 | 2.07676921 |
| 1970   | 71.331  | 5  | 541.386  | 10.000        | 1.111       | -1.340                    | -725.187  | 293098.801  | 1.79426025 |
| 1971   | 284.75  | 6  | 526.446  | 8.333         | 1.136       | -1.256                    | -661.006  | 277145.3909 | 1.57653136 |
| 1972   | 125.048 | 7  | 513.88   | 7.143         | 1.163       | -1.184                    | -608.280  | 264072.6544 | 1.40114569 |
| 1973   | 125.988 | 8  | 450.24   | 6.250         | 1.190       | -1.121                    | -504.629  | 202716.0576 | 1.25619264 |
| 1974   | 68.737  | 9  | 389.3    | 5.556         | 1.220       | -1.065                    | -414.449  | 151554.49   | 1.13337316 |
| 1975   | 289.24  | 10 | 376.52   | 5.000         | 1.250       | -1.014                    | -381.641  | 141767.3104 | 1.02738496 |
| 1976   | 75.104  | 11 | 344.16   | 4.545         | 1.282       | -0.967                    | -332.803  | 118446.1056 | 0.935089   |
| 1977   | 89.27   | 12 | 341.64   | 4.167         | 1.316       | -0.924                    | -315.607  | 116717.8896 | 0.85340644 |
| 1978   | 43.754  | 13 | 322.23   | 3.846         | 1.351       | -0.884                    | -284.690  | 103832.1729 | 0.78057225 |
| 1979   | 99.941  | 14 | 315.72   | 3.571         | 1.389       | -0.846                    | -267.004  | 99679.1184  | 0.71520849 |
| 1980   | 36.436  | 15 | 307.1    | 3.333         | 1.429       | -0.810                    | -248.720  | 94310.41    | 0.65593801 |
| 1981   | 72.011  | 16 | 300.76   | 3.125         | 1.471       | -0.776                    | -233.390  | 90456.5776  | 0.602176   |
| 1982   | 72.032  | 17 | 289.24   | 2.941         | 1.515       | -0.744                    | -215.079  | 83659.7776  | 0.55294096 |
| 1983   | 783.8   | 18 | 284.75   | 2.778         | 1.563       | -0.713                    | -202.913  | 81082.5625  | 0.50779876 |
| 1984   | 121.169 | 19 | 282.94   | 2.632         | 1.613       | -0.683                    | -193.191  | 80055.0436  | 0.46621584 |
| 1985   | 26.405  | 20 | 188.462  | 2.500         | 1.667       | -0.654                    | -123.235  | 35517.92544 | 0.42758521 |
| 1986   | 95.905  | 21 | 125.988  | 2.381         | 1.724       | -0.626                    | -78.868   | 15872.97614 | 0.391876   |
| 1987   | 82.966  | 22 | 125.048  | 2.273         | 1.786       | -0.599                    | -74.891   | 15637.0023  | 0.35868121 |
| 1988   | 68.406  | 23 | 121.169  | 2.174         | 1.852       | -0.573                    | -69.369   | 14681.92656 | 0.32775625 |
| 1989   | 107.567 | 24 | 107.567  | 2.083         | 1.923       | -0.547                    | -58.807   | 11570.65949 | 0.29888089 |
| 1990   | 37.385  | 25 | 106.76   | 2.000         | 2.000       | -0.521                    | -55.665   | 11397.6976  | 0.27185796 |

| Cálculo de los Periodos de Retorno de los Caudales Máximos por el Método de Nash |         |                  |                  |            |           |                       |                   |                    |                |
|--|---------|------------------|------------------|------------|-----------|-----------------------|-------------------|--------------------|----------------|
| Años   | Qmax    | m                | Qmax (>)         | T =(N+1)/m | T / (T-1) | X = log log (T/(T-1)) | Q * X             | Q <sup>2</sup>     | X <sup>2</sup> |
| 1991   | 85.019  | 26               | 99.941           | 1.923      | 2.083     | -0.497                | -49.621           | 9988.203481        | 0.24651225     |
| 1992   | 61.704  | 27               | 98.663           | 1.852      | 2.174     | -0.472                | -46.579           | 9734.387569        | 0.22287841     |
| 1993   | 322.23  | 28               | 98.491           | 1.786      | 2.273     | -0.448                | -44.114           | 9700.477081        | 0.20061441     |
| 1994   | 98.491  | 29               | 95.905           | 1.724      | 2.381     | -0.424                | -40.654           | 9197.769025        | 0.17969121     |
| 1995   | 51.464  | 30               | 91.143           | 1.667      | 2.500     | -0.400                | -36.475           | 8307.046449        | 0.16016004     |
| 1996   | 98.663  | 31               | 89.27            | 1.613      | 2.632     | -0.377                | -33.610           | 7969.1329          | 0.14175225     |
| 1997   | 58.143  | 32               | 85.019           | 1.563      | 2.778     | -0.353                | -30.003           | 7228.230361        | 0.12453841     |
| 1998   | 662     | 33               | 82.966           | 1.515      | 2.941     | -0.329                | -27.321           | 6883.357156        | 0.10843849     |
| 1999   | 341.64  | 34               | 75.104           | 1.471      | 3.125     | -0.306                | -22.944           | 5640.610816        | 0.09333025     |
| 2000   | 307.1   | 35               | 72.032           | 1.429      | 3.333     | -0.282                | -20.284           | 5188.609024        | 0.07929856     |
| 2001   | 450.24  | 36               | 72.011           | 1.389      | 3.571     | -0.257                | -18.536           | 5185.584121        | 0.06625476     |
| 2002   | 315.72  | 37               | 71.331           | 1.351      | 3.846     | -0.233                | -16.606           | 5088.111561        | 0.05419584     |
| 2003   | 188.462 | 38               | 70.876           | 1.316      | 4.167     | -0.208                | -14.728           | 5023.407376        | 0.04318084     |
| 2004   | 106.76  | 39               | 68.737           | 1.282      | 4.545     | -0.182                | -12.517           | 4724.775169        | 0.03316041     |
| 2005   | 376.52  | 40               | 68.406           | 1.250      | 5.000     | -0.156                | -10.637           | 4679.380836        | 0.02418025     |
| 2006   | 541.386 | 41               | 61.704           | 1.220      | 5.556     | -0.128                | -7.898            | 3807.383616        | 0.016384       |
| 2007   | 344.16  | 42               | 58.143           | 1.190      | 6.250     | -0.099                | -5.768            | 3380.608449        | 0.00984064     |
| 2008   | 572.29  | 43               | 51.464           | 1.163      | 7.143     | -0.069                | -3.530            | 2648.543296        | 0.00470596     |
| 2009   | 513.88  | 44               | 43.754           | 1.136      | 8.333     | -0.036                | -1.566            | 1914.412516        | 0.00128164     |
| 2010   | 389.3   | 45               | 39.617           | 1.111      | 10.000    | 0.000                 | 0.000             | 1569.506689        | 0              |
| 2011   | 282.94  | 46               | 39.115           | 1.087      | 12.500    | 0.040                 | 1.572             | 1529.983225        | 0.00161604     |
| 2012   | 568.156 | 47               | 37.385           | 1.064      | 16.667    | 0.087                 | 3.252             | 1397.638225        | 0.007569       |
| 2013   | 526.446 | 48               | 36.436           | 1.042      | 25.000    | 0.146                 | 5.301             | 1327.582096        | 0.02117025     |
| 2014   | 300.76  | 49               | 26.405           | 1.020      | 50.000    | 0.230                 | 6.078             | 697.224025         | 0.05299204     |
|  |         | <b>Sumatoria</b> | <b>10581.470</b> |            |           | <b>-29.413</b>        | <b>-10965.757</b> | <b>4128988.039</b> | <b>30.070</b>  |

Fuente: Elaboración propia

Figura 18: Periodos de retornos de Caudales máximos, calculados por el método Nash para la estación hidrológica Bocatoma Raca Rumi, 1966 - 2014



Fuente: Elaboración propia:

#### 5.1.3.4 Comparación de los periodos de retorno de los caudales máximos (Empírico, Nash y Gumbel)

Los caudales máximos para cada periodo de retorno (2, 5, 10, 20, 50 y 100 años), fueron calculado a través de los métodos Empírico, Nash y Gumbel, haciendo uso de formulaciones matemáticas y de parámetros tabulados en función a la cantidad de años, se lograron obtener los caudales máximos para cada periodo de retorno.

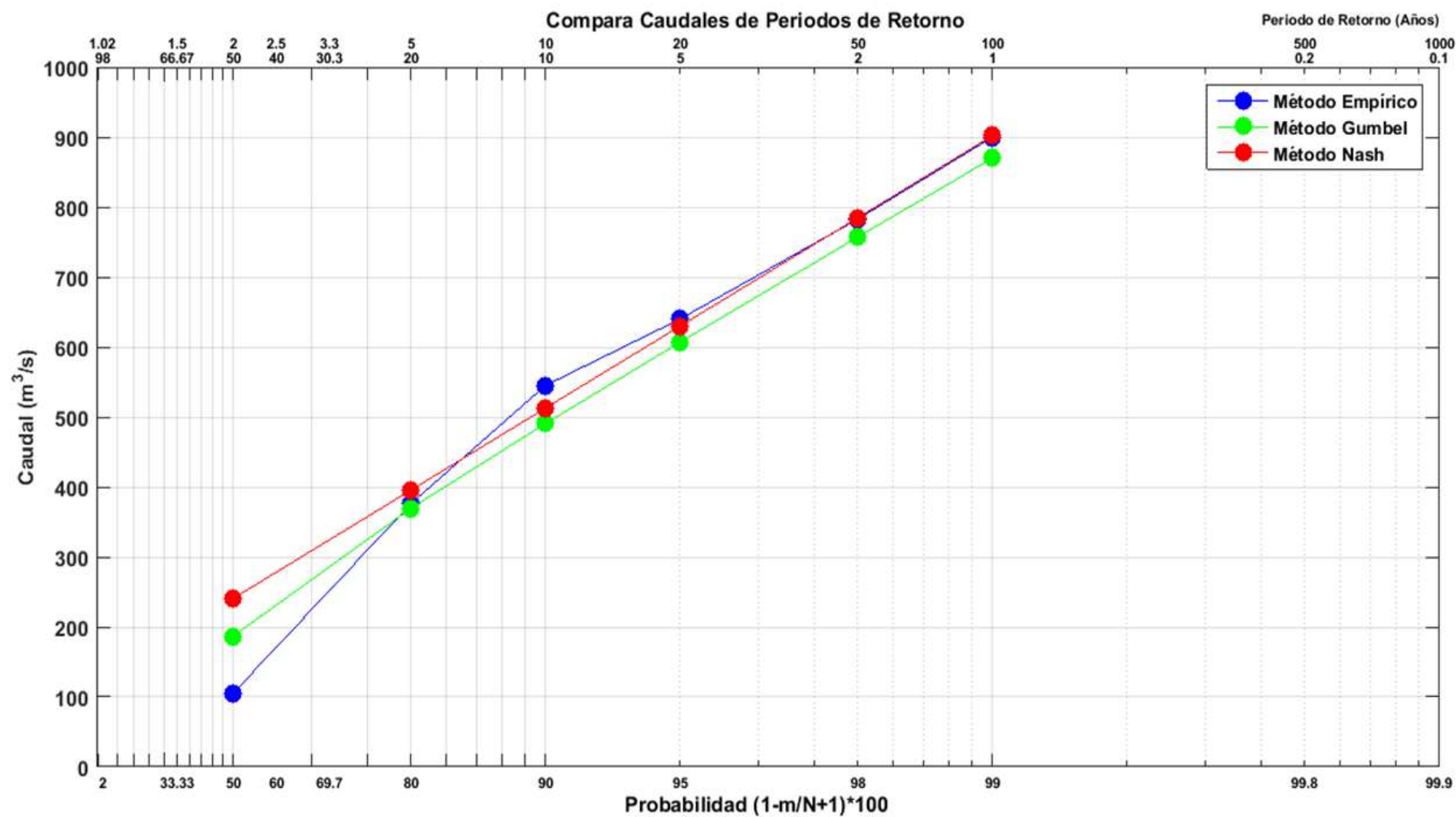
En la Tabla 8, se muestran los caudales máximos obtenidos por cada método, y se tiene que a través del método de Gumbel se obtienen caudales de 25 m<sup>3</sup>/s más altos a los obtenidos por el método de Nash, ver Tabla 8.

*Tabla 8: Caudales máximos asociados a los periodos de retornos, calculados por el método de Nash y Gumbel*

| Periodo de retorno | Caudal máximo de retorno (Probabilístico), m <sup>3</sup> /s |                          |                          |
|--------------------|--|--------------------------|--------------------------|
|                    | Empírico   | Nash                     | Gumbel                   |
| <b>2 años</b>      | 105,00 m <sup>3</sup> /s                                     | 186,63 m <sup>3</sup> /s | 240,48 m <sup>3</sup> /s |
| <b>5 años</b>      | 376,00 m <sup>3</sup> /s                                     | 369,58 m <sup>3</sup> /s | 395,43 m <sup>3</sup> /s |
| <b>10 años</b>     | 545,00 m <sup>3</sup> /s                                     | 490,71 m <sup>3</sup> /s | 512,65 m <sup>3</sup> /s |
| <b>20 años</b>     | 640,00 m <sup>3</sup> /s                                     | 606,90 m <sup>3</sup> /s | 629,87 m <sup>3</sup> /s |
| <b>50 años</b>     | 783,00 m <sup>3</sup> /s                                     | 757,29 m <sup>3</sup> /s | 784,82 m <sup>3</sup> /s |
| <b>100 años</b>    | 900,00 m <sup>3</sup> /s                                     | 869,99 m <sup>3</sup> /s | 902,04 m <sup>3</sup> /s |

*Fuente: Elaboración propia*

Figura 19: Comparación de los Periodos de retorno de caudales máximos, calculados por los métodos Gumbel y Nash para la estación hidrológica Bocatoma Raca Rumi, periodo 1966 a 2014



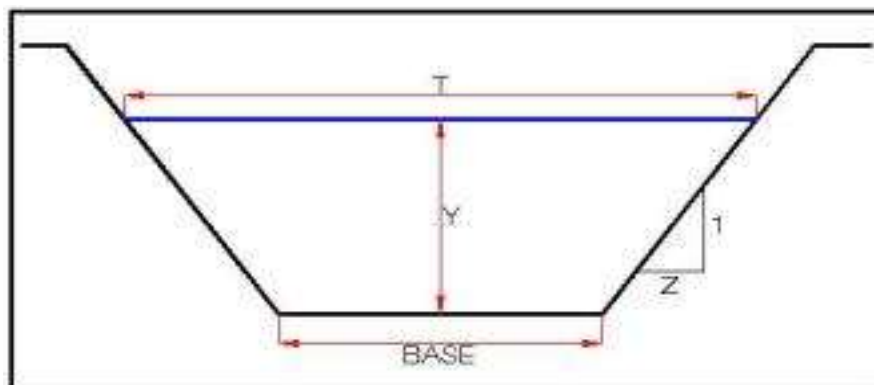
Fuente: Elaboración propia:

## 5.2 Implementación del modelo numérico HEC-RAS para el primer kilómetro del canal de alimentación al reservorio Tinajones

Para la implementación del modelo numérico HEC-RAS al primer kilómetro del canal de alimentación hacia el reservorio de Tinajones, fue necesario seguir los siguientes pasos:

- ✓ Establecer el número de secciones transversales que comprenderán el primer kilómetro del canal de alimentación hacia el reservorio de Tinajones.
- ✓ Determinar las características geométricas de las secciones transversales del canal de alimentación (eje del canal, longitud de las márgenes izquierda y derecha del canal, delimitación del área de flujo).
- ✓ Determinar los parámetros asociados a las secciones del canal de alimentación hacia el reservorio de Tinajones, como coeficientes de rugosidad.
- ✓ Definir los escenarios de los caudales a evaluar a través del canal de alimentación.
- ✓ Crear los archivos correspondientes a cada etapa (proyecto de simulación, geometría, plan) de la implementación del modelo HEC-RAS al canal de alimentación.
- ✓ Evaluar los diferentes escenarios de flujo de caudal a través del canal de alimentación hacia el reservorio de Tinajones.

*Figura 20: Forma geométrica de la sección transversal del canal trapezoidal*

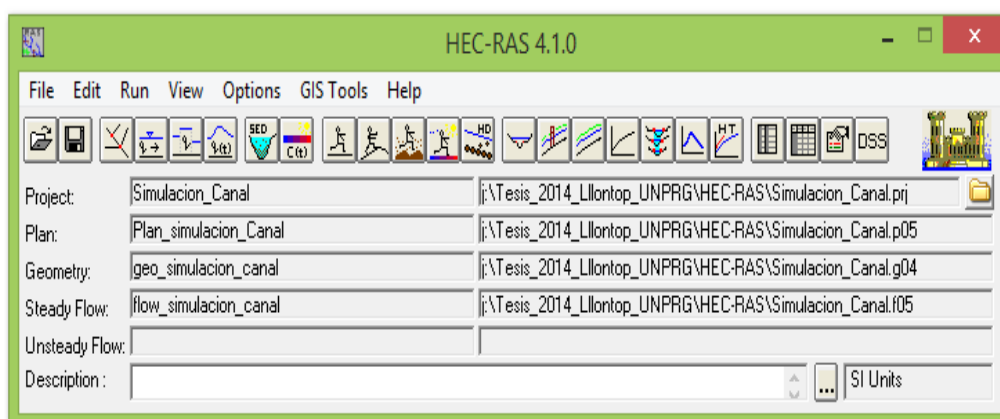


Fuente: Elaboración propia

### Crear Proyecto

Se inició creando la carpeta de trabajo denominada “TESIS”, en este directorio se colocan todos los documentos y archivos creados durante la implementación del modelo HEC-RAS para el primer kilómetro del canal de alimentación hacia el reservorio Tinajones. La Figura 21, muestra la interface de inicialización del modelo HEC-RAS con los nombres de los archivos que comprenden la implementación del modelo para presente proyecto.

*Figura 21: Imagen de los archivos de configuración del modelo HEC-RAS implementado para el primer kilómetro del canal de alimentación.*



*Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS*

Diseño de la geometría y las secciones transversales del primer kilómetro del canal de alimentación hacia el reservorio Tinajones

Durante esta etapa, se definió que el primer kilómetro del canal de alimentación hacia el reservorio de Tinajones, sería representado a través de seis (06) secciones transversales, con una separación constante de 200 metros entre cada una de ellas, haciendo un total de un kilómetro de distancia.

Para definir la geometría del canal, fue necesario identificar las principales características asociadas al canal de alimentación del reservorio Tinajones, como: la forma del canal (trapezoidal), dimensiones (altura y ancho) del canal, tipo de material del cual está revestido el canal (hormigón), coeficiente de rugosidad Manning (de



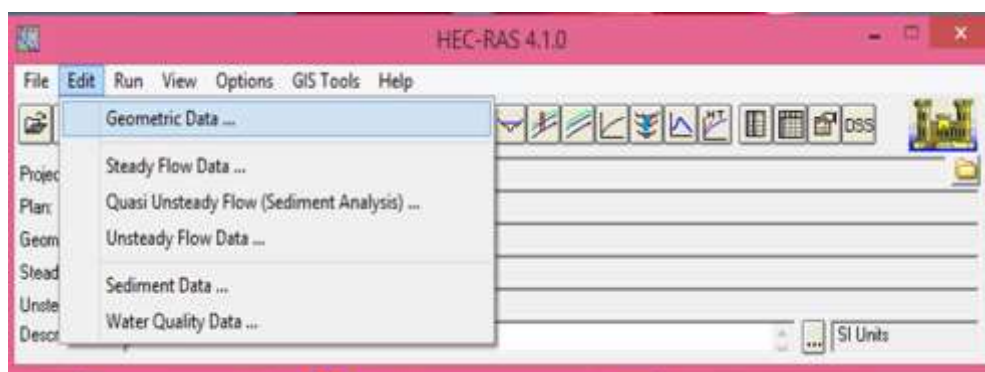
acuerdo al tipo del material), pendiente del canal, dirección o sentido del flujo del agua en el canal, una vez identificada y definida las características del canal de alimentación, se procedió a implementar todas estas características a asociadas al canal en el modelo HEC-RAS, para los cual se siguió el siguiente procedimiento:

1º Abrir la ventana o interface del modelo HEC-RAS para definir la geometría del canal, ir al menú **Edit** y luego al sub-menú **Geometric Data**. Ver Figura 22.

2º Abrir la ventana de edición de secciones transversales (**Cross Section Data**), y elegimos la opción agregar una sección transversal. Ver Figura 23.

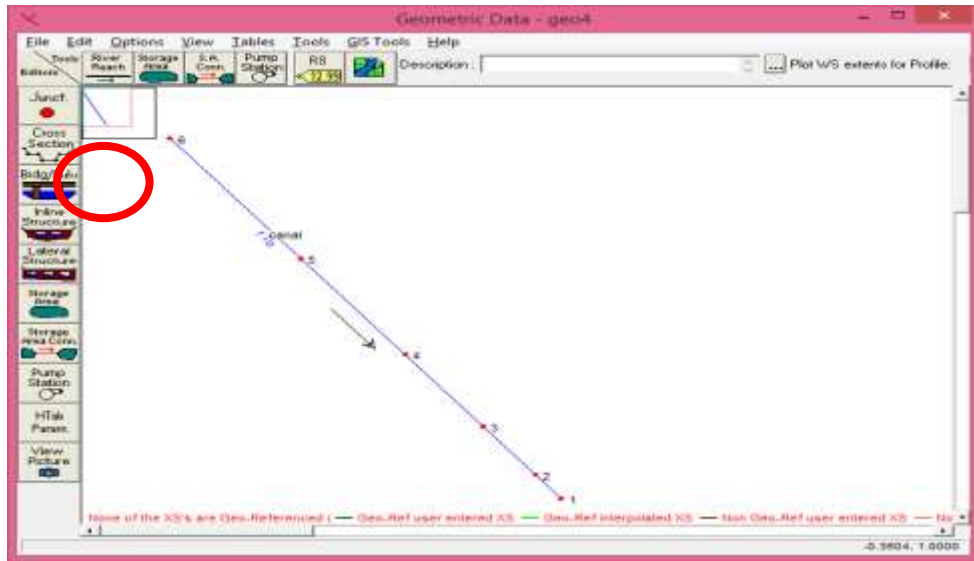
3º A medida que se va definiendo las secciones transversales, estas van tomando un número correlativo, en esta etapa se debe tener en cuenta que se debe iniciar por definir e ingresar las secciones transversales desde aguas abajo hacia aguas arriba del cauce del canal de alimentación. En nuestro caso tendremos seis secciones transversales. Ver Figura 23.

*Figura 22: Define e ingresa la información geométrica del primer kilómetro del canal de alimentación hacia el reservorio Tinajones*



*Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS*

Figura 23: Interface donde se implementa y agregan las secciones transversales del canal de alimentación.



Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS

4º En cada una las seis (06) secciones transversales se ingresan y asignan los diversos parámetros asociados al primer kilómetro del canal de alimentación hacia el reservorio Tinajones.

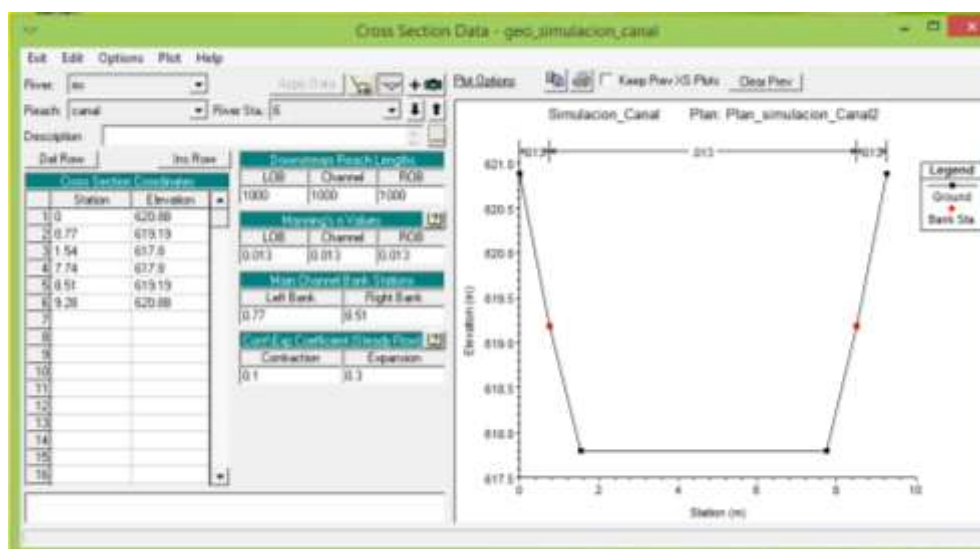
- Distancia de separación de cada sección transversal (Down stream Reach Lengths) respecto a la primera sección, en este caso se fue ingresando valores múltiplos de 200.
- Coeficiente de rugosidad de Manning (Manning's Value), de acuerdo al libro Hidráulica de Canales de Máximo Villón (2002), para el caso de canales revestidos por hormigón o concreto, le corresponde un valor de 0.013.
- Nivel de referencia del agua en el canal (Main Channel Bank Stations), al momento de la implementación, en nuestro caso consideramos 1,5 m de altura de nivel de agua en el canal.

- Coeficientes de contracción y expansión (Contraction and Expansion Coeficiente), consideramos un valor de 0,1 para el coeficiente de contracción y de 0,3 la expansión.

- Las coordenadas de la forma del canal, tomando como referencia el lado izquierdo del canal.

5º Una vez definidos todos los parámetros de cada sección transversal, es necesario guardar la información, para lo cual clicamos en Aplicar Data (Apply Data) del menú y nos aparece la representación gráfica de la sección en la parte derecha de la interface gráfica. Ver Figura 24.

*Figura 24: Representación gráfica de una sección transversal del canal de alimentación*



*Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS*

6º Sucesivamente se fueron definiendo las seis secciones transversales representativas del primer kilómetro del canal de alimentación.

7º Para todas las secciones del canal se utilizó una pendiente de inclinación del canal de 0.2%, por lo tanto, fue necesario considerar para cada sección transversal del canal un delta de altura de 20 cm.

### 5.2.1.1 Establecer los escenarios de simulación (caudales de flujos)

En esta etapa se definen los escenarios de simulación que se realizarán con el modelo HEC-RAS para evaluar el nivel del agua que alcanzarían el primer kilómetro del canal de alimentación hacia el reservorio Tinajones. En la Tabla 9 se define los escenarios de simulación.

Para definir los escenarios de simulación es necesario definir el tipo de flujo a evaluar y los volúmenes de caudal a evaluar, en la Figura 25.

Tabla 9: Escenarios de simulación, se evalúan seis posibles de caudales

| Escenario    | Caudal de simulación  |
|--------------|-----------------------|
| Escenario 01 | 10 m <sup>3</sup> /s  |
| Escenario 02 | 20 m <sup>3</sup> /s  |
| Escenario 03 | 50 m <sup>3</sup> /s  |
| Escenario 04 | 70 m <sup>3</sup> /s  |
| Escenario 05 | 100 m <sup>3</sup> /s |
| Escenario 06 | 120 m <sup>3</sup> /s |

Fuente: Elaboración propia

Figura 25: Escenarios de simulación para el primer kilómetro del canal de alimentación hacia el reservorio Tinajones

The screenshot shows the 'Steady Flow Data - flow\_simulacion\_canal' window in HEC-RAS. The window has a menu bar (File, Options, Help) and a toolbar with buttons for 'Enter/Edit Number of Profiles (25000 max):', 'Reach Boundary Conditions ...', and 'Apply Data'. Below the toolbar, there are dropdown menus for 'River:' (set to 'rio') and 'Reach:' (set to 'canal'), along with a 'River Sta.' dropdown (set to '6'). There are also buttons for 'Add Multiple...' and 'Add A Flow Change Location'. The main area contains a table with two parts: 'Flow Change Location' and 'Profile Names and Flow Rates'. The 'Flow Change Location' table has columns for 'River', 'Reach', and 'RS'. The 'Profile Names and Flow Rates' table has columns for 'Escenario 01', 'Escenario 02', 'Escenario 03', 'Escenario 04', 'Escenario 05', and 'Escenario 06'. The table data is as follows:

| Flow Change Location |       |    | Profile Names and Flow Rates |              |              |              |              |              |
|----------------------|-------|----|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| River                | Reach | RS | Escenario 01                 | Escenario 02 | Escenario 03 | Escenario 04 | Escenario 05 | Escenario 06 |
| 1 rio                | canal | 6  | 10                           | 20           | 50           | 70           | 100          | 120          |
| 2 rio                | canal | 2  | 10                           | 20           | 50           | 70           | 100          | 120          |
| 3 rio                | canal | 1  | 10                           | 20           | 50           | 70           | 100          | 120          |

At the bottom of the window, there is a text box labeled 'Edit Steady flow data for the profiles (m3/s)'.

Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS

### 5.2.1.2 Ejecución de las simulaciones (escenarios)

Una vez creada y definida la geometría de las secciones transversales de los primeros kilómetros del canal alimentador hacia el reservorio Tinajones, el siguiente paso es introducir los datos referentes al tipo de simulación a realizar:

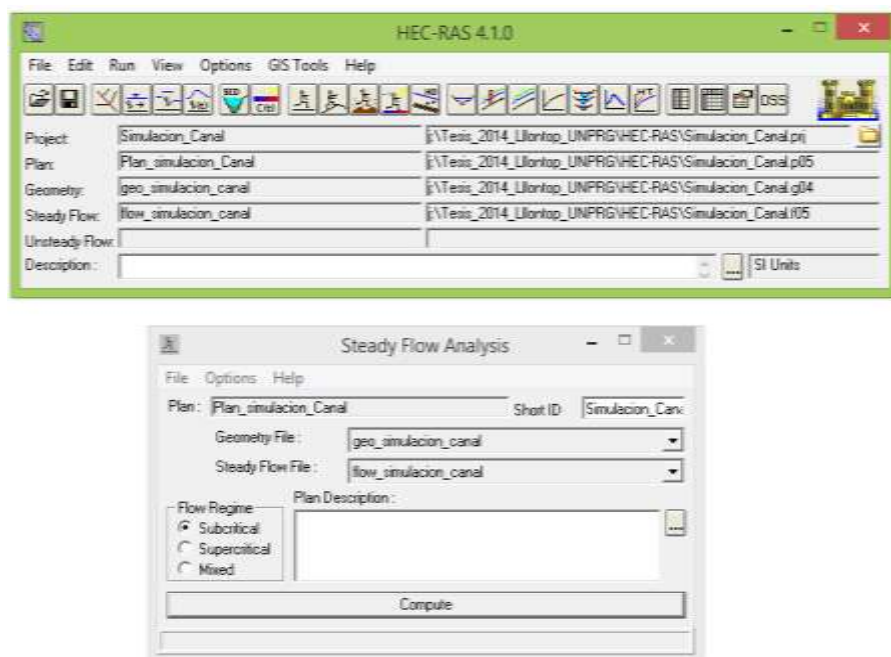
- Caudal del flujo,
- Condiciones de evaluación

En este caso, suponemos que el flujo va a ser subcrítico, con lo que definiremos la condición de contorno en la sección aguas abajo.

Cada plan o simulación se efectúa aplicando unos datos de flujo (Steady Flow File) a una geometría (Geometry File).

Finalmente en la Figura 26 se muestra una ventana del progreso de la simulación propia del modelo en la que se muestra información sobre la misma y si ha sido realizada correctamente.

Figura 26: Ejecución de los escenarios de simulación



Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS

### 5.2.2 Resultados de los Escenarios de simulación

La Tabla 10, se muestra las alturas del nivel del agua alcanzados en el canal alimentador por cada uno de los seis (06) escenarios de simulación evaluados en el primer kilómetro del canal alimentador hacia el reservorio tinajones.

El modelo HEC-RAS permitió determinar que para un caudal de avenida de 10 m<sup>3</sup>/s se registró una altura de nivel de agua de 0,63 m, mientras que para un caudal de avenida 20 m<sup>3</sup>/s se registró una altura de 0,99; y para un caudal de 50 m<sup>3</sup>/s se registró una altura de nivel de agua de 1.76 m ; y para un caudal 70 m<sup>3</sup>/s se registró una altura de nivel de agua de 2.18 m; mientras que para un caudal de 100m<sup>3</sup>/s se registró una altura de 2.73m; y para un caudal de 120 m<sup>3</sup>/s se registró una altura de 3,05 m.

*Tabla 10: Resultados de los seis (06) escenarios de simulación caudales y altura del nivel agua alcanzados en el primer kilómetro del canal alimentador*

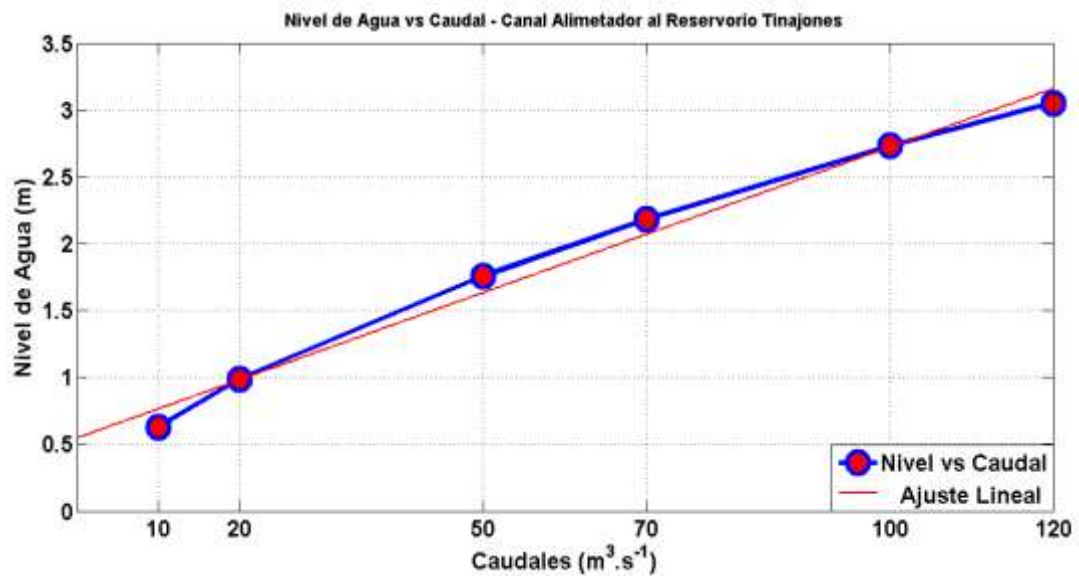
| <b>Escenarios</b>  | <b>Caudal de avenida (m<sup>3</sup>/s)</b> | <b>Altura del nivel de agua (m)</b> |
|--------------------|--|-------------------------------------|
| <b>Escenario 1</b> | 10   | 0,63                                |
| <b>Escenario 2</b> | 20   | 0,99                                |
| <b>Escenario 3</b> | 50   | 1,76                                |
| <b>Escenario 4</b> | 70   | 2,18                                |
| <b>Escenario 5</b> | 100  | 2,73                                |
| <b>Escenario 6</b> | 120  | 3,05                                |

*Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 27 se observa, las alturas del nivel del agua alcanzados en los primeros kilómetros del canal alimentador para cada uno de los seis (06) escenarios de simulación. Considerando que las alturas del nivel de agua alcanzado en un canal dependen de la forma del canal, e incrementan de forma semi-proporcional al volumen de agua que fluye a través de vez del canal, aunque en el caso del primer kilómetro del canal de alimentación hacia el reservorio Tinajones, se tiene una forma trapezoidal, esta forma del canal produce que el incremento del caudal produzca un

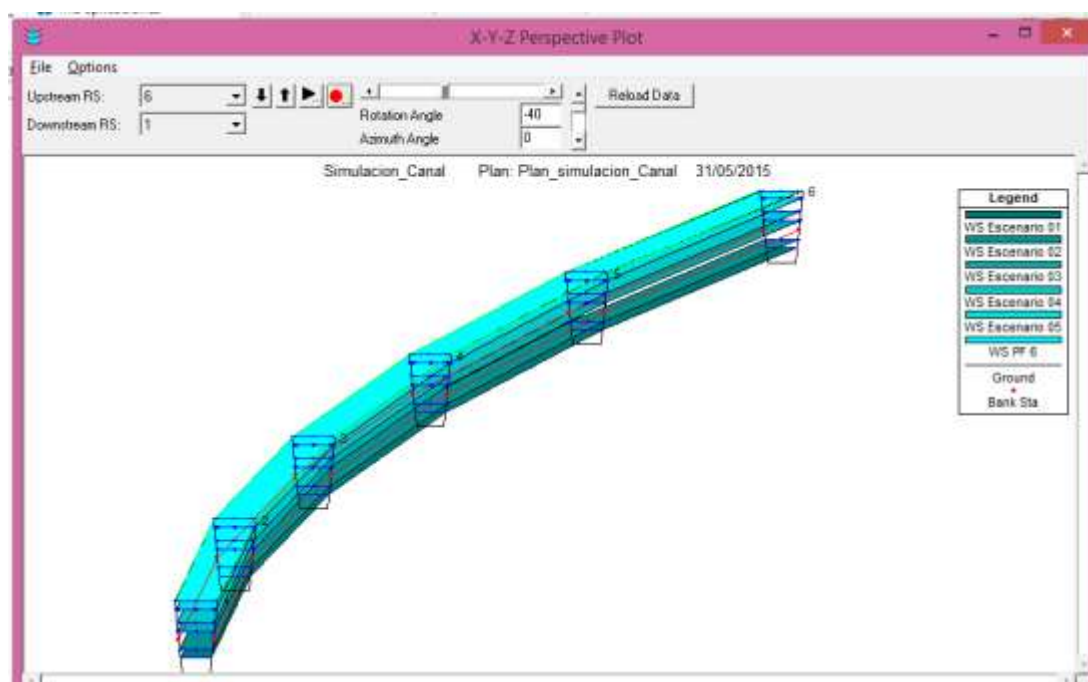
aumento del nivel de agua, pero a su vez no sería del todo lineal (si el canal de alimentación fuera rectangular si obtendríamos un ajuste lineal ya que tanto la altura como los caudales serían proporcionales). En Figura 28 se muestra el nivel de agua alcanzados a lo largo del primer kilómetro del canal hacia el reservorio.

*Figura 27: Resultados de los seis (06) escenarios de simulación caudales y altura del nivel agua alcanzados en el primer kilómetro del canal alimentador*



*Fuente: Elaboración propia*

Figura 28: Altura de nivel de agua alcanzado en el canal alimentador para cada de los seis escenarios de simulación (10, 20, 50, 70, 100 y 120 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)

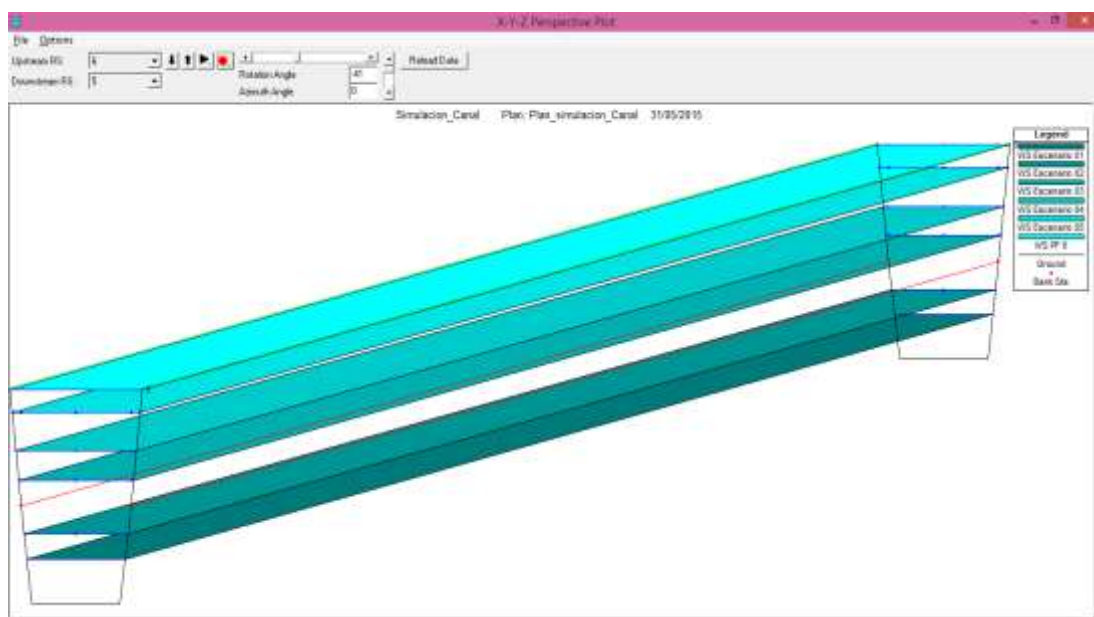


Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS

En la Figura 29 se muestran las alturas del nivel del agua alcanzados entre las secciones transversales cinco y seis del primer kilómetro del canal de alimentación, se aprecia muy claramente como varía el nivel del agua en cada uno de los escenarios. En Figura 30 se aprecia muy claramente las variaciones de las alturas del nivel del agua alcanzadas en la sección transversal seis (06) del primer kilómetro del canal de alimentación.

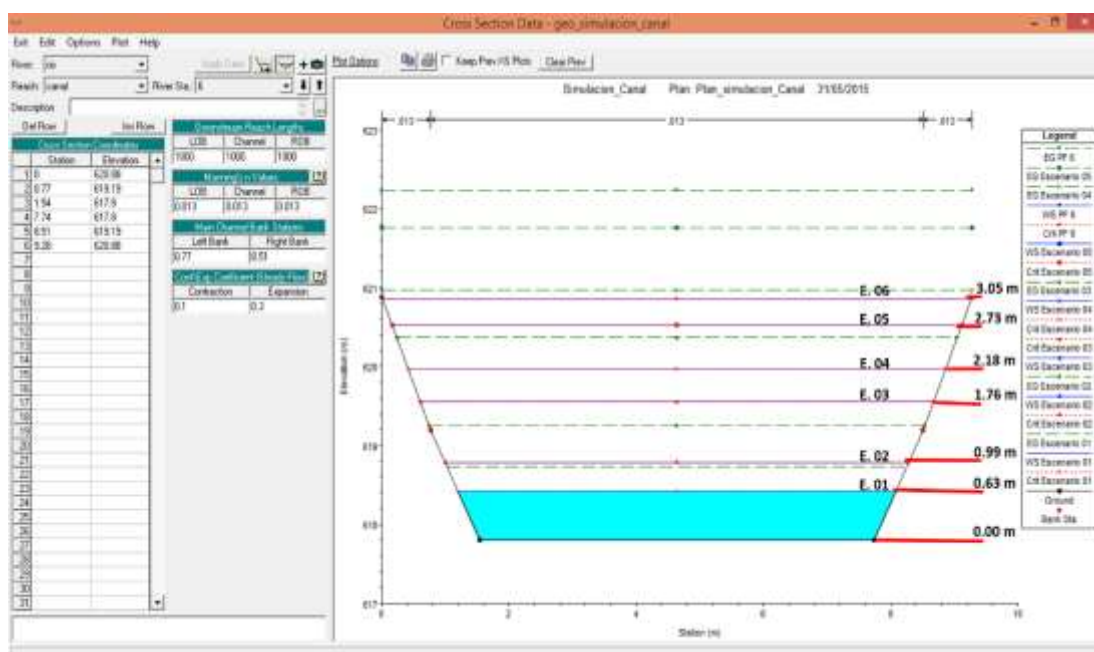


Figura 29: Niveles de agua alcanzados entre la sección 5 y 6 para los seis escenarios de simulación



Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS

Figura 30: Nivel de agua en el canal alimentador, para los seis escenarios de simulación



Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS

### 5.3 Validación del Modelado del Primer Kilómetro del Canal de Alimentación al Reservorio de Tinajones

A fin de realizar la validación del nivel de agua calculado con el modelo HEC-RAS para diversos flujos de aguas a través del primer kilómetro del canal de alimentación al reservorio de Tinajones, en esta sección evaluaremos en forma teórica el nivel de agua alcanzado en el canal para diversos escenarios de flujo de agua.

En principio partimos de la fórmula de Manning, que se refiere al coeficiente de Chézy.

$$C = \frac{1}{n} R(h)^{1/6} \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

De donde, por substitución en la fórmula de Chézy, se deduce su forma más habitual: o,

$$V(h) = \frac{1}{n} R(h)^{2/3} \sqrt{S} \quad (\text{Ecuación 5.2})$$

$$Q(h) = \frac{1}{n} A R(h)^{2/3} \sqrt{S} \quad (\text{Ecuación 5.3})$$

Y se puede escribir de la siguiente forma (Sistema Internacional)

$$V(h) = \frac{1}{n} * \left( \frac{A(h)}{P(h)} \right)^{2/3} * S^{1/2} \quad (\text{Ecuación 5.4})$$

$$Q(h) = \frac{1}{n} * \frac{A(h)^{5/3}}{P(h)^{2/3}} * S^{1/2} \quad (\text{Ecuación 5.5})$$

Dónde:

h = es igual a la altura del agua en el canal y puede ser representado por la letra 'Y'.

$A(h)$ = Área mojada (área de la sección del flujo de agua), en m<sup>2</sup>, función del tirante hidráulico **h**.

$P(h)$ = Perímetro mojado, en m, función del tirante hidráulico **h**

$n$ = Un parámetro que depende de la rugosidad de la pared, su valor varía entre 0,01 para paredes muy pulidas (p.e., plástico) y 0,06 para ríos con fondo muy irregular y con vegetación.


$V(h)$ = Velocidad media del agua en m/s, que es función del tirante hidráulico

$Q(h)$ = Caudal del agua en m<sup>3</sup>/s, en función del tirante hidráulico **h**

$S$ = la pendiente de la línea de agua en m/m

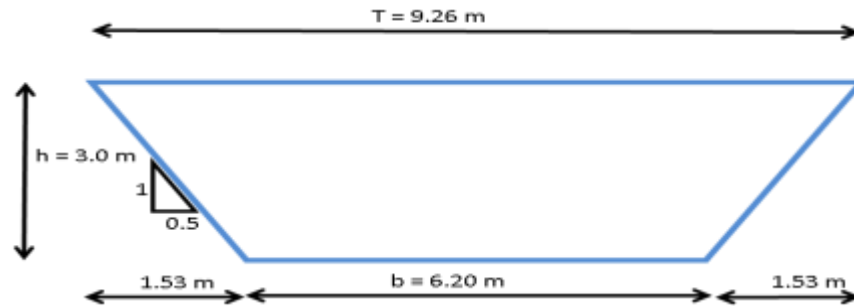
Los principales parámetros hidráulicos asociados al primer kilómetro del canal alimentador al reservorio de Tinajones, corresponden a los parámetros de una sección trapezoidal y se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Parámetros asociados a un canal trapezoidal

| SECCIÓN<br>TRAPEZOIDAL   | ÁREA<br>HIDRÁULICA A | PERÍMETRO<br>MOJADO P  | RADIO<br>HIDRÁULICO R                    | ESPEJO<br>DE AGUA T |
|--|----------------------|------------------------|--|---------------------|
|  <p>Trapezoidal</p> | $(b + zy)y$          | $b + 2y\sqrt{1 + z^2}$ | $\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$ | $b + 2zy$           |

Fuente: Elaboración propia

Figura 31: Valores a las dimensiones del canal alimentador del reservorio Tinajones



*Fuente: Elaboración propia*

Los cálculos de los parámetros asociados a la sección trapezoidal del canal y del caudal de agua que fluye por el primer kilómetro del canal alimentador del reservorio Tinajones, se muestran en la

*Tabla 12: Parámetros hidráulicos calculados para la sección trapezoidal del canal alimentador del reservorio Tinajones, para cada uno de los escenarios de simulación*

| Escenario | Altura (m) | Área (m <sup>2</sup> ) | Perímetro (m) | Radio Hidráulico | Espejo de agua (m) | Caudal de agua (m <sup>3</sup> /s) |
|-----------|------------|------------------------|---------------|------------------|--------------------|------------------------------------|
| 01        | 0.63 m     | 4.10                   | 7.61          | 0.54             | 6.83               | 9.36                               |
| 02        | 0.99 m     | 6.62                   | 8.41          | 0.79             | 7.19               | 19.45                              |
| 03        | 1.76 m     | 12.46                  | 10.14         | 1.23             | 7.96               | 49.19                              |
| 04        | 2.18 m     | 15.89                  | 11.07         | 1.43             | 8.38               | 69.55                              |
| 05        | 2.73 m     | 20.65                  | 12.30         | 1.68             | 8.93               | 100.34                             |
| 06        | 3.05 m     | 23.56                  | 13.02         | 1.81             | 9.25               | 120.36                             |

*Fuente: Elaboración propia*

Los parámetros hidráulicos y el caudal de flujo de agua de cada escenario de la Tabla 12 fueron calculados a través del siguiente código Matlab:

Código Matlab para realizar la validación

```
% Altura de nivel de agua a evaluar
y = [0.63 0.99 1.76 2.18 2.73 3.05];

% Parámetros hidráulicos de la sección trapezoidal del canal
alimentador
b = 6.2;      % Base del canal
z = 0.5;      % Talud del canal (z)
n = 0.013;    % Coeficiente de Manning
S = 0.002;    % Pendiente del canal

A = (b + z.*y).*y;      % Área de la sección del canal
P = b + 2*y.*sqrt(1 + z*z); % Perímetro de la sección del
canal
R = A. /P;              % Radio hidráulico
T = b + 2*z.*y;        % Tirante o longitud de agua en la
superficie del canal

Q = (1/n)*A.*((R). ^ (2/3)).*sqrt(S);
Vel = (1/n).*(R). ^ (2/3)).*sqrt(S);
```

Los niveles de agua obtenidos de los caudales propuestos para la simulación de los escenarios con el modelo HEC-RAS, fueron evaluados y verificados teóricamente a través del uso de la fórmula teórica de Manning, llegándose a obtener valores de flujo de caudales de agua muy cercanos a los evaluados inicialmente en el modelo HEC-RAS, la validación se muestra en la Tabla 13 y el coeficiente de correlación entre los caudales evaluados en el modelo HEC-RAS vs los caudales obtenidos con la fórmula de Manning tienen un valor de 1.

Tabla 13: Validación del modelo HEC-RAS vs la formulación teórica de Manning

| Escenario | Usando el modelo HEC-RAS           |                             | Usando la fórmula teórica de Manning |   |
|-----------|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|---|
|           | Caudal Evaluado(m <sup>3</sup> /s) | Altura de Agua obtenida (m) | Altura de Agua Evaluada (m)          | Caudal de agua obtenida (m <sup>3</sup> /s) |
| 01        | 10                                 | 0.63 m                      | 0.63 m                               | 9.36  |
| 02        | 20                                 | 0.99 m                      | 0.99 m                               | 19.45                                       |
| 03        | 50                                 | 1.76 m                      | 1.76 m                               | 49.19                                       |
| 04        | 70                                 | 2.18 m                      | 2.18 m                               | 69.55                                       |
| 05        | 100                                | 2.73 m                      | 2.73 m                               | 100.34                                      |
| 06        | 120                                | 3.05 m                      | 3.05 m                               | 120.36                                      |

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4 Modelado del Rio Chancay en la Sección Cercana a la Estación Raca Rumi

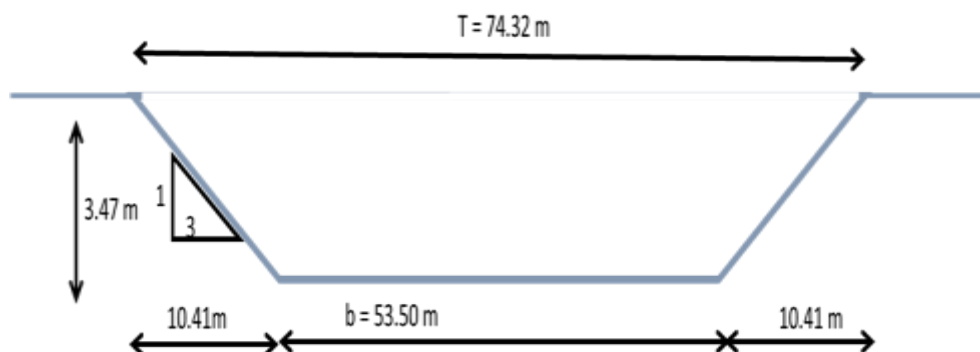
En esta sección se analiza el caudal y la velocidad del flujo de agua que atraviesa la sección transversal del rio Chancay en la zona cercana a la estación Raca Rumi a través del uso de formula teórica de Manning y del modelo HEC-RAS

##### 5.4.1 Modelado del Rio Chancay a través de la formulación teórica

En la Figura 32, se muestra la sección transversal del rio Chancay en la zona cercana a la bocatoma Raca Rumi, se aprecia que en esa sección el rio tiene forma trapezoidal con una longitud estimada de 53.50 m de largo en la base y 3.47 m de alto, con una inclinación lateral de 1/3, llegando a tener una longitud aproximada de 74.32 m en la parte superior de la sección del rio.

Se llegó a determinar los parámetros hidráulicos, el caudal del agua y la velocidad de agua que atravesaría por la sección transversal del canal para diferentes alturas de nivel de agua desde 0 hasta 3.47 m, con un incremento de 0.5 m. Estos cálculos fueron realizados a través de la formula teórica de Manning, los resultados se muestran en la Tabla 14.

Figura 32: Valores de la sección transversal del rio Chancay en la zona cercana a la bocatoma Raca Rumi, con pendiente = 1.5 ‰, Coeficiente de rugosidad  $n = 0.03$ .



Fuente: Elaboración propia

Tabla 14: Parámetros hidráulicos calculados a través de la fórmula teórica de Manning para la sección trapezoidal del río Chancay en la zona cercana a la estación de Raca Rumi

| Escenario | Altura de nivel de agua (m) | Área (m <sup>2</sup> ) | Perímetro (m) | Radio Hidráulico | Espejo de agua (m) | Caudal de agua (m <sup>3</sup> /s) | Velocidad del agua (m/s) |
|-----------|-----------------------------|------------------------|---------------|------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 01        | 0.0 m                       | 0.00                   | 53.50         | 0.00             | 53.50              | 0                                  | 0                        |
| 02        | 0.5 m                       | 27.50                  | 56.66         | 0.49             | 56.50              | 69.3                               | 2.52                     |
| 03        | 1.0 m                       | 56.50                  | 59.82         | 0.94             | 59.50              | 222.0                              | 3.93                     |
| 04        | 1.5 m                       | 87.00                  | 62.99         | 1.38             | 62.50              | 440.5                              | 5.06                     |
| 05        | 2.0 m                       | 119.00                 | 66.15         | 1.79             | 65.50              | 718.6                              | 6.04                     |
| 06        | 2.5 m                       | 152.50                 | 69.31         | 2.20             | 68.50              | 1053.2                             | 6.90                     |
| 07        | 3.0                         | 187.50                 | 72.47         | 2.59             | 71.50              | 1442.6                             | 7.69                     |
| 08        | 3.47                        | 221.77                 | 75.45         | 2.94             | 74.32              | 1857.8                             | 8.38                     |

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.2 Modelado del Río Chancay a través del modelo HEC-RAS

En esta sección se muestran los resultados de la evaluación de la sección transversal del río Chancay de la zona cercana a la estación de Raca Rumi a través del modelo HEC-RAS, para lo cual se tomó como concepto base, el supuesto de la sección transversal del río se mantienen invariante en una distancia de los 100 primeros metros a la zona cercana a la estación Raca Rumi, con una pendiente de variación de nivel de terreno  $S$  de 1.5‰, y un coeficiente de rugosidad  $n$ , correspondiente a un fondo natural con algunas vegetación y piedras esparcidas con un valor de  $n = 0.03$  (Figura 32).

La implementación de las dos secciones transversales del río Chancay en un trayecto de 100 metros cercanos a la estación de Raca Rumi se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.2 del capítulo de métodos.

A través del modelo HEC-RAS se evaluaron seis escenarios de flujos de caudales a través de la sección transversal del río Chancay, con el fin de poder realizar una comparación entre los resultados obtenidos con la formulación teórica de Manning, para el modelo HEC-RAS se utilizaron los caudales resultantes (Tabla 14) y los resultados de las altura de nivel de agua se muestran en la Tabla 15.

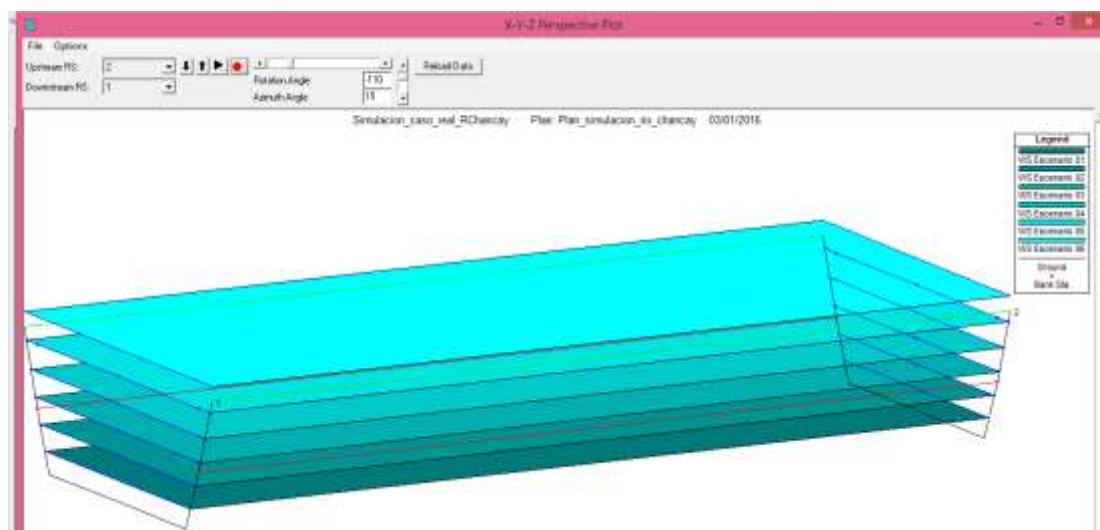
*Tabla 15: Resultados de los seis (06) escenarios de simulación caudales y las alturas del nivel agua alcanzados en la sección transversal del río Chancay en la zona cercana a la estación Raca Rumi.*

| Escenarios         | Caudal de avenida (m³/s) | Altura del nivel de agua (m) |
|--------------------|--------------------------|------------------------------|
| <b>Escenario 1</b> | 69.3                     | 0.52                         |
| <b>Escenario 2</b> | 222.0                    | 1.11                         |
| <b>Escenario 3</b> | 440.5                    | 1.79                         |
| <b>Escenario 4</b> | 718.6                    | 2.46                         |
| <b>Escenario 5</b> | 1053.2                   | 3.15                         |
| <b>Escenario 6</b> | 1442.6                   | 3.85                         |

*Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 33 se muestran los niveles de agua alcanzados en cada uno de los escenarios de evaluación evaluados a través del modelo HEC-RAS para el tramo de los 100 metros cercanos a la estación Raca Rumi.

*Figura 33: Niveles a agua alcanzado en cada uno de los escenarios evaluados en la sección del río Chancay*



*Fuente: Imagen captura por los autores a partir de la ejecución del modelo HEC-RAS*



## **CAPÍTULO VI**

# **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

✓ Se analizó la información histórica de los caudales diarios, mensuales y máximos anuales registrados en la estación hidrológica de la Bocatoma Raca Rumi, se llegó a determinar que los caudales presentan un ciclo anual, con caudales máximos durante los meses verano y mínimos durante los meses de junio a setiembre de cada año.

✓ A partir de los caudales diarios se determinó que durante los meses de febrero, el caudal varía entre 15,5 a 233,5 m<sup>3</sup>/s, para marzo, el caudal varía entre 18,5 a 353,5 m<sup>3</sup>/s, para abril, el caudal varía entre 22,1 a 276,5 m<sup>3</sup>/s, para mayo, el caudal varía entre 14,5 a 136,0 m<sup>3</sup>/s. Los meses de junio a setiembre, presentan un rango de variación relativamente bajo, con caudales mínimos (entre 2,7 y 5,1 m<sup>3</sup>/s) y caudales máximos (entre 27,2 a 47,3 m<sup>3</sup>/s); los mes de octubre a enero, presentan un rango de variación moderado, con caudales mínimos (entre 5,0 y 7,4 m<sup>3</sup>/s) y caudales máximos (entre 75,2 y 115,5 m<sup>3</sup>/s).

✓ A partir de los caudales mensuales se determinó que los caudales promedios más altos, se presentan durante los meses de enero a mayo de cada año y varían entre 33,7 a 90,1 m<sup>3</sup>/s y caudales mínimos se presentan durante los meses de junio a diciembre y varían entre 8,4 a 29,2 m<sup>3</sup>/s

✓ Se calcularon los caudales máximos para los periodos de retornos de 10, 20, 50 y 100 años, llegándose a determinar que a través del método de Gumbel se obtienen caudales de 25 m<sup>3</sup>/s más altos a los obtenidos por el método de Nash.

✓ Se implementó el modelo numérico HEC-RAS para el primer kilómetro del canal de alimentación hacia el reservorio Tinajones, para lo cual fue necesario seguir el siguiente procedimiento: Establecer el número de secciones transversales representativas para el primer kilómetro del canal de alimentación hacia el reservorio de Tinajones; determinar las características geométricas de las secciones

transversales del canal de alimentación (eje del canal, longitud de las márgenes izquierda y derecha del canal, delimitación del área de flujo); determinar los parámetros asociados a las secciones del canal de alimentación como, coeficientes de Manning; definir los escenarios de los caudales a evaluar a través del canal de alimentador; una vez definido todos los parámetros se procedió a crear los archivos correspondientes a cada etapa (proyecto de simulación, geometría, plan de simulación y la ejecución del modelo) de la implementación del modelo HEC-RAS.

✓ Se logró evaluar seis escenarios de caudales de avenida a través del primer kilómetro del canal alimentador hacia el reservorio Tinajones, el caudal de 10 m<sup>3</sup>/s llegó a alcanzar una altura de nivel de agua de 0,63 m, un caudal de 20 m<sup>3</sup>/s llegó a alcanzar una altura de nivel de agua de 0,99 m; para un caudal de 50 m<sup>3</sup>/s se llegó a registrar una altura de nivel de agua de 1,76 m ; para un caudal 70 m<sup>3</sup>/s se registró una altura de nivel de agua de 2,18 m; para un caudal de 100 m<sup>3</sup>/s se registró una altura de nivel de agua de 2,73m; y para un caudal de 120 m<sup>3</sup>/s se registró una altura de nivel de agua de 3,05 m.

✓ Se utilizó la fórmula teórica de Manning, para validar los niveles de altura de agua calculados por el modelo HEC-RAS para cada uno de los escenarios de simulación en el primer kilómetro del canal alimentador del Reservorio Tinajones, llegándose a obtener valores de flujo de caudales de agua cercanos a los evaluados inicialmente en el modelo HEC-RAS, con un coeficiente de correlación de 1.

✓ Se evaluó los parámetros hidráulicos, de flujo y velocidad en la sección transversas del rio a través de la formula teórica de Manning, por otro lado se determinó a través del modelo HEC-RAS las alturas de nivel de agua que podría alcanzar el rio Chancay en la zona cercana a la estación Raca Rumi, llegándose a determinar a caudales de flujo de agua mayores a 1000 m<sup>3</sup>/s producirían que el flujo de agua en el rio supere los 3.0 metros de altura.

## **6.2 Recomendaciones**

- ✓ Evaluar otras metodologías y software para determinar periodos de retornos de caudales máximos para la cuenca del rio Chancay-Lambayeque.

- ✓ Aplicar el modelo HEC-RAS para otros sectores de la cuenca del rio Chancay-Lambayeque y evaluar diversos escenarios de caudales de avenidas, de esta forma se podría evaluar posibles zonas de impacto y vulnerabilidad a inundaciones en la cuenca del rio Chancay-Lambayeque.

## **REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA**

**Referencia Bibliográfica**

- ✓ Abbott M. B., Basco D. R. 1989. Computational Fluid Dynamics. An Introduction for Engineers. Logman Scientific, 425 pp.
- ✓ Arriola, G., Bejarano, L. 2013. Estudio de los Métodos de Análisis Basados en la Superposición de Componentes de Socavación para Pilares Complejos aplicados al Puente Reque. Tzhoecoen, 177-198 pp.
- ✓ Autoridad Nacional del Agua (ANA) 2010. Tratamiento de Cauce del Rio para el Control de Inundaciones en la Cuenca Chancay Lambayeque, Informe Técnico de la Dirección de Estudios de Proyectos Hidráulicos Multisectorial de la ANA, Ministerio de Agricultura.
- ✓ CAHUA S.A.C. 2005. Estudio de Naturalización de Información del Rio Chancay Año 1997, Estudio presentado al Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERG), [http://www2.osinerg.gob.pe/procreg/tarifasbarra/ProcMay07-Abril08/PresEstTecEcon\\_COES/AnexoF\\_P4.pdf](http://www2.osinerg.gob.pe/procreg/tarifasbarra/ProcMay07-Abril08/PresEstTecEcon_COES/AnexoF_P4.pdf), 28 pp.
- ✓ Chow, V., D. Maidment, L. Mays. 1994. Hidrología Aplicada. Editorial Mc Graw-Hill. Bogotá, Colombia. 583 pp.
- ✓ Fernández, F. 1995. Manual de Climatología Aplicada. Clima, medio ambiente y planificación. Editorial Síntesis S. A., Madrid, España. 285 pp.
- ✓ HEC-RAS. 2010. Manual de Referencia Hidráulica del Modelo HEC-RAS (River Analysis System), versión 4.1, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, formato digital PDF,
- ✓ HEC-RAS. 2010. Manual de Usuario del Modelo HEC-RAS (River Analysis System), versión 4.1, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, formato digital PDF,

- ✓ Llamas, J. 1993. Hidrología General. Principios y Aplicaciones. Editorial Universitaria del País Vasco, Bilbao, España. 635 pp.
- ✓ Pizarro, R. 1993. Elementos Técnicos de Hidrología III. Proyecto Regional Mayor sobre Uso y Conservación de Recursos Hídricos en Áreas Rurales de América Latina y el Caribe. Universidad de Talca, Talca, Chile. 135 pp
- ✓ Villón M. 2000. Hidráulica de Canales, 4ta Edición, Editorial Tecnológica de Costa Rica, ISBN 9977-66-081-6
- ✓ Villón M. (2002); Hidrología, 2da Edición, Editorial Tecnológica de Costa Rica

## Anexos

### ***Programa Matlab para determinar los periodos de Retornos del caudal máximo por el método de Gumbel***

```

Clear all, close all, clc

% Cálculo del Periodo de Retorno por el método de Gumbel
dat = xlsread('Qmax_anuales_1966_2014.xlsx');

tiempo = dat(:,1);
caudal = dat(:,2);

N = size(caudal,1);
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(tiempo,caudal,'.-')

subplot(212)
hist(caudal,12)

n = 1;
for T = [10 20 50 100]
    Tr(n) = T;
    Qm = mean(caudal);
    Dq = std(caudal);
    [Yn,Dn] = tabla_6p13(N);
    % Yn = 0.53622;
    % Dn = 1.11238;

    Qmax(n) = Qm - (Dq/Dn) * (Yn - log(T));

    DQ = 1.14 * Dq/Dn;
    Qd(n) = Qmax(n) + DQ;

    n = n + 1;
end

%%
figure(2)
subplot(121)
plot(Tr,Qmax,'o-','LineWidth',2,...
    'MarkerSize',10,...
    'MarkerEdgeColor','b',...
    'MarkerFaceColor','r')
set(gca,'FontS',14,'FontW','Bold')
xlim([0 105])
ylim([0 1200])
grid on
ylabel('Qmax de retorno (m3/s)','FontS',14,'FontW','Bold')
xlabel('Tiempo de retorno (Años)','FontS',14,'FontW','Bold')
title('Periodo de Retorno (GUMBEL)','FontS',14,'FontW','Bold')

```



### ***Programa Matlab para determinar los periodos de Retornos del caudal máximo por el método de Nash***

```

Clear all, close all, clc

% Cálculo del Periodo de Retorno por el método de Nash
dat = xlsread('Qmax_anuales_1966_2014.xlsx');

tiempo = dat(:,1);
caudal = dat(:,2);

N = size(caudal,1);
Q = sort(caudal, 'descend');

for n = 1:N
    T1(n) = (N+1)/n;
    T2(n) = (T1(n))/(T1(n)-1);
    X(n) = log10(log10(T2(n)));
    QxX(n) = Q(n)*X(n);
    Q2(n) = power(Q(n),2);
    X2(n) = power(X(n),2);
end

SQ = sum(Q);
SQ2 = sum(Q2);
SX = sum(X);
SX2 = sum(X2);
SQX = sum(QxX);

Qm = SQ/N;
Xm = SX/N;

b = (SQX - N*Xm*Qm) / (SX2 - N*power(Xm,2));
a = Qm - (b * Xm);

n = 1;
for T = [10 20 50 100];
    Tr(n) = T;
    Qmax(n) = a + b * log10(log10(T/(T-1)))
    n = n + 1;
end

figure(2)
subplot(121)
plot(Tr,Qmax, 'o-', 'LineWidth',2,...
    'MarkerSize',10,...
    'MarkerEdgeColor','b',...
    'MarkerFaceColor','r')
set(gca, 'FontS',14, 'FontW', 'Bold')
xlim([0 105])
ylim([0 1200])
grid on
ylabel('Qmax de retorno (m3/s)', 'FontS',14, 'FontW', 'Bold')
xlabel('Tiempo de retorno (Años)', 'FontS',14, 'FontW', 'Bold')
title('Periodo de Retorno (NASH)', 'FontS',14, 'FontW', 'Bold')

```

### ***Imágenes de la estación hidrológica de la Bocatoma Raca Rumi***

A continuación se muestran imágenes de la Estación Hidrológica de la Bocatoma Raca Rumi, del Rio Chancay y del canal alimentador hacia el reservorio de Tinajones, las imágenes fueron tomadas por los autores de la tesis durante la segunda semana del mes de mayo del 2015.

Figura 34: Tramo del canal alimentador hacia el reservorio Tinajones



Fuente: fotografía tomada por los autores

Figura 35: Puente Raca Rumi ubicado sobre la carretera cercana a la Bocatoma Raca Rumi



Fuente: fotografía tomada por los autores

*Figura 36: Flujo de agua que ingresa al canal alimentador desde la Bocatoma Raca Rumi hacia el reservorio Tinajones*



*Fuente: fotografía tomada por los autores*

*Figura 37: Vista del sistema de compuertas de la Bocatoma Raca Rumi.*



*Fuente: fotografía tomada por los autores*

*Figura 38: Cerco que limita el ingreso a la estación hidrológica en la Bocatoma Raca Rumi*



*Fuente: fotografía tomada por los autores*

*Figura 39: Sistema de elevación de compuertas de la Bocatoma Raca Rumi*



*Fuente: fotografía tomada por los autores*



*Figura 40: Sistema de captación de agua para ser derivada hacia el canal alimentador para el reservorio Tinajones*



*Fuente: fotografía tomada por los autores*

*Figura 41: Vista de la Bocatoma Raca Rumi, antes de iniciar el sector regulado de la cuenca Chancay-Lambayeque.*



*Fuente: fotografía tomada por los autores*

*Figura 42: Vista de la Bocatoma Raca Rumi, posterior al sector regulado de la cuenca Chancay-Lambayeque.*



*Fuente: fotografía tomada por los autores*

*Figura 43: Vista del Río Chancay antes de llegar a la Bocatoma Raca Rumi, en una parte del sector no regulado de la cuenca Chancay-Lambayeque*



*Fuente: fotografía tomada por los autores*