



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,  
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE VOLUMEN DE  
AGUA EN LOS EMBALSES DE MAZAR Y AMALUZA EN LA  
PROVINCIA DEL AZUAY-ECUADOR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: THEILOR JHICSON SUQUILANDA RAMON**

**JOSÉ IGNACIO TACURI JARAMILLO**

**DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA**

**CUENCA - ECUADOR**

**2021**

*Yo me gradué en  
los 50 años de La Cato!  
... y sostuve la Universidad*



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,**

**INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA EN  
LOS EMBALSES DE MAZAR Y AMALUZA EN LA PROVINCIA DEL  
AZUAY-ECUADOR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: THEILOR JHICSON SUQUILANDA RAMON**

**JOSÉ IGNACIO TACURI JARAMILLO**

**DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA.**

**CUENCA - ECUADOR**

**2021**

*Yo me gradúe en  
los 50 años de La Cato!  
... y sostuve la Universidad*

## I. Declaración

Nosotros, **Theilor Jhicsón Suquilanda Ramon** y **José Ignacio Tacuri Jaramillo** portadores de la cédula de ciudadanía N.º **1104852981** y **0106744204**. Declaramos ser los autores de la obra: “**ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA EN LOS EMBALSES DE MAZAR Y AMALUZA EN LA PROVINCIA DEL AZUAY-ECUADOR**”, sobre la cual nos hacemos responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que nuestra obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también nos responsabilizamos y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, **05 de agosto de 2021**

---

Theilor Jhicsón Suquilanda Ramón

1104852981

---

José Ignacio Tacuri Jaramillo

0106744204

## II. Certificación



Cuenca, 05 de agosto del 2021

Por medio del presente documento, certifico que en calidad de tutor he revisado las correcciones realizadas a las observaciones del Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de INGENIERO CIVIL, cuyo tema es “ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACION DEL VOLUMEN DE AGUA EN LOS EMBALSES DE MAZAR Y AMALUZA EN LA PROVINCIA DEL AZUAY-ECUADOR”, trabajo realizado por los estudiantes THEILOR JHICSON SUQUILANDA RAMÓN y JOSÉ IGNACIO TACURI JARAMILLO, cumpliendo en el documento final los cambios acorde a las observaciones realizadas por los revisores ING. DIEGO CORONEL e ING. CARLOS MATOVELLE.

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'S. Aurelio Ochoa G.'.

**ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA PhD.  
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **III. Dedicatoria**

*A mis padres Pedro Tacuri y Elisa Jaramillo quienes me han brindado su apoyo incondicional tanto en mi educación como en el camino de la vida que ha hecho de mi un hombre profesional, trabajador y respetuoso.*

*A mi esposa Erika Pacheco y mi hija Elisa Tacuri quienes son la razón y mi fuerza para superarme día con día. A mis hermanos Francisco Tacuri y Valentina Tacuri, con los que compartimos una vida de apoyo y cariño mutuo.*

*A mi compañero de Tesis Theilor Suquilanda ya que trabajando conjuntamente pusimos en práctica todos los conocimientos aplicados en nuestra vida estudiantil. A mi compañera Gabriela Pozo por su buena amistad.*

*A mis maestros y amigos ya que sin su apoyo nunca hubiera podido hacer esta tesis. A todos ellos está dedicada este proyecto de tesis y mis buenos deseos desde el fondo de mi corazón*

***Ignacio Tacuri***

*Este trabajo lo dedico a mis queridos padres Delicio Suquilanda y Margarita Ramón que han sido la luz para guiarme por el buen camino bríndame sus enseñanzas para ser un hombre de bien, respetuoso y trabajador, no existe palabras para agradecerles todo lo que me han brindado.*

*A mis preciados hermanos Tania, Alexander, Carlos, Diana, Abigail los cuales siempre me han brindado sus consejos, sus motivaciones para seguir adelante gracias por todo ese cariño. A mis queridos sobrinos que siempre han sido ese pequeño rayo de luz que me ayuda para crecer y ser mejor persona.*

*A mis cuñados Luz, Enrique, Edy y Félix por ser unas excelentes personas que me han acompañado a lo largo de esta trayectoria*

*A mi compañero de tesis Ignacio Tacuri por todo ese apoyo mutuo para la realización de este trabajo de tesis. A mis queridos amigos Luis, Cesar, Michael, Jorge, Robinson, Paul, John, Rogger, Jean, José, Nicolay, Antonio, Pedro por siempre estar ahí y compartir buenos momento al largo de esta vida.*

*A mi querida compañera de aventuras una excelente amiga Yessica que a pesar de todas las circunstancias de la vida estado apoyándome y compartiendo un pedacito de su vida gracias por ser esa excelente persona que me ayudo cuando más lo necesitaba.*

***Theilor Suquilanda***

#### **IV. Agradecimiento**

*En primer lugar, agradecemos a Dios por brindarnos sabiduría y sus bendiciones a lo largo de nuestra vida universitaria.*

*A nuestras familias por brindarnos todo su apoyo incondicional pese a las dificultades que se han presentado en este largo camino de preparación y sacrificio que ha dado sus frutos.*

*A nuestros tutores ingeniero Santiago Ochoa e ingeniero Carlos Matovelle junto con su sabiduría y experiencia han sabido guiarnos en este proyecto de tesis.*

*A la Universidad Católica de Cuenca, directivos y docentes de la carrera de Ingeniería Civil por su contribución en la adquisición de conocimientos para la formación de excelentes profesionales.*

***Theilor Suquilanda e Ignacio Tacuri***

## **V. Resumen**

Considerando que el Ecuador por sus condiciones climáticas y topográficas es rico en recursos hídricos y puesto que el aprovechamiento de estos es fundamental para el desarrollo de las poblaciones; como es el caso de las centrales hidroeléctricas las cuales son la principal fuente generadora de energía eléctrica renovable en el mundo, es por ello que se ve la necesidad de aprovecharlos y regularlos. En el presente trabajo en función de los diferentes parámetros geomorfológicos obtenidos en los sistemas de información geográfica y de los datos de las estaciones meteorológicas e hidrológicas facilitados por la INAMHI se realizó la construcción de los modelos hidrológicos e hidráulicos ejecutados en el software HEC-HMS y HEC-ResSim, obteniendo una optimización poco conservadora en el embalse Mazar y Amaluza para la generación eléctrica ya que se propuso destinar un 27% del volumen total del embalse Mazar al Amaluza contribuyendo a que este no presente problemas en su operación.

**Palabras Clave:** Generación eléctrica, embalse, volumen, HEC-HMS, HEC-ResSim.

## **VI. Abstract**

Considering that Ecuador, due to its climatic and topographic conditions, is rich in water resources and since the use of these resources is essential for the development of populations, as is the case of hydroelectric power plants, which are the main source of renewable electricity generation in the world, it is, therefore, necessary to use and regulate them. In this work, based on the different geomorphological parameters obtained in the geographic information systems and data from meteorological and hydrological stations provided by the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI, in Spanish), the construction of hydrological and hydraulic models executed in the HEC-HMS and HEC-ResSim software was conducted, obtaining a little conservative optimization in the Mazar and Amaluza reservoir for electricity generation, since it was proposed to allocate 27% of the total volume of the Mazar reservoir to the Amaluza, contributing to avoid problems in its operation.

Keywords: Power Generation, reservoir, volume, HEC-HMS, HEC-RESSIM.

## VII. Tabla de contenido

I. Declaración .....	1
II. Certificación .....	2
III. Dedicatoria .....	3
IV. Agradecimiento .....	4
V. Resumen.....	5
VI. Abstract .....	6
VII. Tabla de contenido .....	7
VIII. Introducción.....	17
IX. Antecedentes .....	18
Definición de la zona de estudio.....	20
X. Justificación.....	24
XI. Objetivos .....	25
Objetivo General.....	25
Objetivos Específicos .....	25
XII. Marco metodológico .....	26
Procesamiento de datos.....	26
Análisis de la Cartografía .....	27
Estudio de la cuenca hidrológica .....	28
Alternativas para la optimización del volumen de agua de los embalses.....	28

Capítulo 1: Marco Teórico .....	30
1.1 Procesamiento y análisis de la información .....	30
1.1.1 Información climatológica.....	30
1.1.2 Información hidrológica. ....	30
1.1.3 Información de los embalses .....	35
1.1.3.1 <i>Clasificación</i> de embalses. ....	35
1.1.3.2 <i>Características de los embalses.</i> .....	37
1.1.4 Información de embalses de estudio .....	39
1.2 Estudio hidrológico.....	41
1.2.3 Estudio hidrológico de cuencas.....	41
1.2.3 Volúmenes de regulación y almacenamiento .....	62
1.2.4 Análisis de las series de tiempo y regulación en embalses.....	63
1.3 Modelación matemática .....	65
1.3.1 Aplicación de modelos matemáticos hidráulicos e hidrológicos.....	65
1.3.1.2 <i>Evaluación de parámetros</i> .....	68
1.3.1.3 <i>Hidrología estocástica</i> .....	69
1.3.1.4 <i>Simulación estocástica de series hidrológicas de tiempo.</i> .....	69
1.3.2 Principios del programa de simulación HEC-HMS.....	72
1.3.3 Principios del programa de simulación HEC-ResSim.....	76
Capítulo 2: Análisis Hidrológico de las subcuencas del del Rio Paute.....	88

2.1 Aplicación de un sistema de información geográfica para el análisis geomorfológico de la cuenca .....	88
2.1.1 Parámetros geomorfológicos .....	90
2.1.1.1 Área de las subcuencas.....	91
2.1.1.2 Pendiente media de la cuenca y pendiente media del cauce principal .....	92
2.1.1.3 Red de drenaje.....	95
2.1.1.4 Factores de relieve y forma de la cuenca .....	98
2.1.1.5 Curva hipsométrica .....	102
2.1.1.6 Numero de curva de Cuenca de análisis.....	105
2.1.1.7 Índice de Rugosidad de la Cuenca de Análisis Numero de curva de Cuenca de análisis. ....	109
2.1.1.8 Tiempos de concentración.....	112
2.1.1.9 Altura sobre el nivel del mar .....	113
2.1.1.10 Longitudes.....	115
2.1.2 Parámetros hidrológicos .....	117
2.1.2.1 Rellenado de datos faltantes .....	125
2.2 Simulación hidrológica de la cuenca .....	128
2.2.1 Aplicación del software HEC-HMS a la cuenca media y alta de rio paute. ....	128
2.2.2 Análisis estadístico para la calibración del modelo implementado.....	138
2.2.3 Análisis estadístico para la validación del modelo implementado.....	147

2.2.4 Presentación de resultado e hidrogramas. ....	150
Capítulo 3: Análisis de La Gestión de la Operación de Embalses .....	155
3.1 Curvas de capacidad del embalse Mazar y Amaluza.....	155
3.2 Aplicación de software HEC-ResSim para los embalses Mazar y Amaluza.....	164
3.2.1 Watershed setup o módulo de configuración de cuenca .....	164
3.2.2 Reservoir Network o módulo de red de embalse .....	165
3.2.3 Componentes físicos .....	165
3.2.4 Componentes de operación .....	168
3.2.5 Simulación.....	172
3.3 Relación de la gestión de operación de los embalses Mazar y Amaluza para la optimización de generación hidroeléctrica.....	174
3.3.1 Generación eléctrica con el mínimo de operación del embalse Amaluza y Mazar.....	175
3.3.2 Generación eléctrica con el máximo de operación del embalse Amaluza y Mazar.....	178
3.3.3 Relacion de Nivel – Volumen – Generacion de los embalses Mazar y Amaluza .....	180
3.4 Recomendaciones técnicas para la operación de los embalses Mazar y Amaluza	184
Capítulo 4: Resultados y Conclusiones.....	191
4.1 Análisis de Resultados .....	191
4.2 Conclusiones.....	196
XIII. Bibliografía.....	199

XIV. Anexos .....	205
-------------------	-----

### Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1. Embalse Mazar. ....	22
Ilustración 2. Embalse Amaluza. ....	23
Ilustración 3. Mapa de la cuenca del Rio Paute .....	32
Ilustración 4. Composición de los embalses. ....	36
Ilustración 5 Embalse Mazar .....	39
Ilustración 6. Represa y embalse Mazar. ....	40
Ilustración 7. Represa y Embalse Amaluza. ....	41
Ilustración 8. Curva guía y zonas propuesta según HEC-ResSim. ....	78
Ilustración 9. Subcuencas de análisis.....	90
Ilustración 10. Mapa de pendientes de las subcuencas. ....	93
Ilustración 11. Mapa orden de corrientes.....	96
Ilustración 12. Mapa de curvas hipsométricas de las subcuencas de análisis.....	102
Ilustración 13. Rangos de la curva hipsométrica .....	103
Ilustración 14. Mapa del Numero de curva (CN). ....	107
Ilustración 15. Mapa de distribución de rugosidades. ....	109
Ilustración 16. Mapa de estaciones Hidrometeorológicas .....	118
Ilustración 17. Mapa de estaciones subcuenca de análisis.....	121
Ilustración 18 Mapa de estaciones subcuenca con datos completos.....	124
Ilustración 19. Esquema preliminar del modelo hidrológico.....	132
Ilustración 20. Módulo Watershed Setup. ....	165
Ilustración 21. Módulo Reservoir Network de Mazar. ....	166

## Tabla de figuras

Figura. 1. Estación Meteorológica.....	33
Figura. 2. Forma de la cuenca de drenaje y su relación con un hidrograma de precipitaciones.....	43
Figura. 3. Tipos de curvas hipsométricas .....	49
Figura. 4 Modelo matemático de caja negra.....	68
Figura. 5. Características de los módulos de HEC-ResSim.....	80
Figura. 6 Delimitación de una cuenca hidrográfica.....	89
Figura. 7 Área de cada subcuenca. ....	92
Figura. 8 Pendiente media de la cuenca y cauce principal. ....	95
Figura. 9 Longitud de la red hídrica de cada subcuenca.....	97
Figura. 10 Orden de la corriente de cada subcuenca. ....	98
Figura. 11 Comparación radial de los factores de forma.....	100
Figura. 12 Densidad de drenaje .....	101
Figura. 13. Curvas hipsométricas de subcuencas.....	104
Figura. 14. Comparación de curvas hipsométricas de subcuencas VS. Curvas hipsométricas estándar.....	104
Figura. 15 Tiempos de Concentración.....	113
Figura. 16 Comparación de cotas y frecuencia altimétrica.....	115
Figura. 17 Comparación radial de longitudes .....	117
Figura. 18. Caudales sin rellenar de la estación Paute.....	126
Figura. 19. Curva de doble masa .....	127
Figura. 20. Relleno de datos de caudales de estación incompleta.....	128
Figura. 21. Histograma de caudales observados del embalse.....	133
Figura. 22 Análisis comparativos de información observada y simulada de entrada.....	136
Figura. 23. Análisis comparativo de información observada y simulada de entrada. ....	137
Figura. 24. Datos de entrada para la primera calibración. ....	139
Figura. 25. Datos dispersados de entrada para la primera calibración. ....	140
Figura. 26. Datos de simulación calibrada.....	142
Figura. 27. Datos dispersados de simulación.....	143
Figura. 28. Datos finales calibrados de simulación. ....	144
Figura. 29. Gráfico de datos finales dispersados. ....	145
Figura. 30. Datos validados de simulación. ....	148

Figura. 31. Diagrama de dispersión.....	150
Figura. 32 Hidrograma resultante de caudales a la entra del embalse Mazar. Fuente: HEC-HMS.....	153
Figura. 33 Hidrograma resultante de caudales a la descarga del embalse Mazar.....	154
Figura. 34. Curva de capacidad del embalse Amaluza.....	157
Figura. 35. Curva de capacidad del embalse Mazar.....	161
Figura. 36. Parámetros del Reservorio Mazar.....	167
Figura. 37. Parámetro de reservorio de Amaluza.....	168
Figura. 38. Reglas de operación de Mazar.....	169
Figura. 39. Reglas de operación de Amaluza.....	170
Figura. 40. Alternativa Looockback.....	171
Figura. 41. Datos DSS de simulación del HEC-HMS.....	172
Figura. 42 Planta de energía de Mazar y Amaluza.....	173
Figura. 43 Capacidad de energía de Mazar y Amaluza.....	174
Figura. 44 Nivel diario del embalse Amaluza con el mínimo de operación.....	175
Figura. 45 Generación eléctrica resultado del nivel diario del embalse Amaluza.....	176
Figura. 46 Comportamiento del embalse Mazar con su nivel mínimo de operación.....	177
Figura. 47 Generación eléctrica resultado del nivel diario del embalse Mazar.....	177
Figura. 48 Niveles de operación diarios con su máximo de operación.....	178
Figura. 49 Generación eléctrica del embalse Mazar con su máximo nivel de operación.....	179
Figura. 50 Niveles de operación diarios del embalse Amaluza con su máximo de operación.....	180
Figura. 51. Embalse Amaluza con su nivel máximo de operación.....	180
Figura. 52 Nivel VS Volumen del embalse Mazar.....	181
Figura. 53 Comparación del volumen y generación en su máximo y mínimo nivel de operación del Embalse Mazar.....	182
Figura. 54. Nivel VS Volumen del embalse Amaluza.....	183
Figura. 55 Comparación del volumen y generación en su máximo y mínimo nivel de operación del Embalse Amaluza.....	183
Figura. 56. Nivel diario del embalse Mazar con el máximo de operación propuesto.....	185
Figura. 57 Generación eléctrica del embalse Mazar con el máximo de operación propuesto.....	185
Figura. 58 Nivel diario del embalse Amaluza con el máximo de operación propuesto.....	186

Figura. 59. Nivel diario del embalse Amaluza con el máximo de operación propuesto .....	187
Figura. 60 Comparación de los niveles operación del embalse Mazar .....	188
Figura. 61 Comparación de los niveles y volúmenes de operación del embalse Mazar.....	188
Figura. 62 Comparación de los niveles operación del embalse Amaluza.....	189
Figura. 63 Comparación de los niveles y volúmenes de operación del embalse Amaluza ..	190
Figura. 64 Caudales obtenidos del HEC HMS .....	191
Figura. 65 Porcentajes de calibración y validación del modelo. ....	192
Figura. 66 Comparación de Volúmenes de almacenamiento de los embalses Mazar y Amaluza... ..	193
Figura. 67 Distribución del volumen de almacenamiento en función de sus niveles de operación del embalse Mazar.....	194
Figura. 68 Distribución del volumen de almacenamiento en función de sus niveles de operación del embalse Amaluza.....	195

#### Índice de tablas

Tabla 1: Subcuencas, altas, medias y bajas del área de estudio.....	21
Tabla 2: Clasificación del tamaño de la cuenca hidrográfica. ....	42
Tabla 3: Índice de capacidad. ....	44
Tabla 4: Coeficiente de forma .....	45
Tabla 5: Tipo de pendiente .....	47
Tabla 6: Clasificación de la corriente. ....	51
Tabla 7: Clasificación de suelo método SCS. ....	53
Tabla 8: Patrón de drenaje. ....	54
Tabla 9: Volumen de regulación y almacenamiento central Amaluza. ....	62
Tabla 10: Volumen de regulación y almacenamiento central Mazar. ....	63
Tabla 11: Niveles de operación central Amaluza. ....	64
Tabla 12: Niveles de operación de central Mazar.....	64
Tabla 13: Características de los elementos hidrológicos. ....	73
Tabla 14: Métodos para el cálculo de subcuencas. ....	74
Tabla 15: Métodos empleados en el modelo meteorológico. ....	75
Tabla 16: Parámetros de entrada del HEC-HMS.....	76
Tabla 17: Límites de valores de calibración y validación. ....	87
Tabla 18: Informaciones obtenidas de los diferentes sitios web.....	88

Tabla 19: Tamaña de las subcuencas de análisis. ....	91
Tabla 20: Pendiente media de las subcuencas. ....	93
Tabla 21: Características de la red de drenaje. ....	96
Tabla 22: Factor de forma.....	99
Tabla 23: Densidad de drenaje.....	101
Tabla 24: Clasificación de curvas hipsométrica. ....	105
Tabla 25: Reclasificación.....	106
Tabla 26. Relación entre Uso de suelo y Grupo Hidrológico. ....	107
Tabla 29: Número de curva promedio. ....	108
Tabla 28: Elección de rugosidades según la U.S. Geological Survey. ....	110
Tabla 29: Tiempos de concentración. ....	112
Tabla 30: Cotas de la cuenca hidrográfica.....	114
Tabla 31: Longitudes de la cuenca .....	116
Tabla 32: Estaciones Hidrológicas de la cuenca del Rio Paute. ....	118
Tabla 33. Estaciones Meteorológicas de la cuenca del Rio Paute.....	120
Tabla 34: Estaciones Meteorológicas de la subcuenca análisis. ....	121
Tabla 35: Estaciones hidrológicas de la subcuenca análisis. ....	122
Tabla 36: Estaciones pluviométricas de la subcuenca análisis. ....	125
Tabla 37: Estaciones Limnimétricas de la subcuenca análisis. ....	125
Tabla 38: Resumen de áreas de subcuencas. ....	129
Tabla 39: Datos de requeridos para la estimación de pérdidas por el método SCS. ....	130
Tabla 40: Método de transformación SCS Hidrograma unitario. ....	131
Tabla 41. Valores de los parámetros de Muskingum.....	131
Tabla 42: Resultados de caudales pico del modelo hidrológico.....	134
Tabla 43: Factores de correlación en la simulación inicial.....	137
Tabla 44: Tabla comparativa de datos de simulación inicial.....	140
Tabla 45: Tabla comparativa de datos de simulación intermedia.....	143
Tabla 46: Tabla comparativa de datos de simulación final. ....	145
Tabla 47: Parámetros Muskingum Calibrados.....	146
Tabla 48: Numero de curva calibrados. ....	147
Tabla 49: Tabla comparativa validación.....	149
Tabla 50: Resultados finales caudales picos de las diferentes componentes.....	151
Tabla 51: Factores de correlación de datos.....	153

Tabla 52: Curva de capacidad Amaluza - Área estimada.....	158
Tabla 53: Curva de capacidad - Área estimada de Mazar .....	161
Tabla 54: Niveles mínimos de operación. ....	184
Tabla 55: Registro histórico batimetrías.....	196

## **VIII. Introducción**

Los recursos hídricos son un factor clave en el desarrollo de la población, puesto que contribuyen al bienestar y calidad de vida de las personas. El Ecuador es considerado un país rico en recursos hídricos como consecuencia de sus condiciones climáticas y topográficas, por consiguiente, se ha visto en la necesidad de aprovecharlos y regularlos.

Una de las formas de aprovechar este recurso es aplicándolo para la generación eléctrica, como es el caso del complejo hidroeléctrico Paute Integral, considerado el de mayor relevancia en el Ecuador, esta central se encuentra ubicada en la provincia de la Azuay, en el comúnmente conocido como accidente topográfico de la cola de San Pablo, el cual está rodeado de montañas idóneo para dar lugar al almacenamiento de estos volúmenes de agua.

El complejo hidroeléctrico Paute integral está conformado por Mazar, Molino, Sopladora y Cardenillo en donde cada central almacena grandes cantidades de volumen de agua y de los cuales Mazar y Molino se consideran los más significativos dentro de esto complejo. Dado que estas masas de agua no son aprovechadas en su totalidad es necesario una regulación de los volúmenes de almacenamiento para brindar una mejor producción de energía eléctrica (EP, 2013).

Para la regulación de estos volúmenes de agua se pretende recabar información de los parámetros geomorfológicos en sistemas de información geográfico, para llevar a cabo un análisis hidrológico de las subcuencas de aporte empleando modelos computacionales y de la misma manera para la regulación de volúmenes de agua y planes de operación de la misma.

## **IX. Antecedentes**

Considerando que la energía hidroeléctrica es la energía renovable más utilizada del mundo, dentro del campo de la ingeniería civil se han llevado a cabo diversas investigaciones para la gestión óptima de volúmenes de embalses de las centrales hidroeléctricas como lo menciona (Alvárez, 2013).

Las variables hidráulicas de ríos, lagos y embalses se usan directamente para la predicción de crecidas, para la delimitación de zonas con riesgo de inundación y para el diseño de estructuras en cursos o masas de agua o cerca de ellas. Cuando se relaciona con los caudales de las corrientes o con el volumen de almacenamiento de embalses y lagos, el nivel de agua se utiliza como base para determinar el caudal o el volumen de agua almacenada para el aprovechamiento del recurso para mejorar la calidad de vida de la sociedad (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

El presente estudio tiene la finalidad analizar diferentes metodologías para la operación de centrales hidroeléctricas, orientado a la optimización de embalses, destacando así la metodología que más se acerque al comportamiento real del reservorio. En la investigación de (Celi Contreras & Vélez Arcentales, 2013), se empleó el programa computación HEC-ResSim en la fase operación de almacenamiento para el riego y control de inundaciones, del cual obtuvo el comportamiento en cada uno de los escenarios planteados en cualquier época del año, con el objetivo de brindar soluciones para la optimización del funcionamiento del embalse.

Entorno a la ejecución de un modelo orientado a la gestión de cuencas hidrográficas y embalses, en el Ecuador se encontró la aplicación a los embalses Macul 1 (Celi Contreras & Vélez Arcentales, 2013) y Mocache (Cordero, 2015) del proyecto PACALORI que se centran en el aprovechamiento del recurso para riego y se aplican a cuencas de llanura. Estudios realizados por Stella y Gordon (2019), destacan el uso de la herramienta HEC-ResSim para

generar escenarios alternativos entorno al manejo del recurso hídrico del embalse El Cuchillo, ubicado en Nuevo León, México; donde se presenta una gran fuente de pérdida de agua debido a la evaporación esto se genera por las altas temperaturas de la región.

Como se mencionó anteriormente el proyecto hidroeléctrico Paute integral es el de mayor relevancia del país, donde la central de Mazar y Amaluza constituyen las primeras dos etapas del desarrollo de potencial hidro energético del país.

En el año 1983 entro en operación con 5 generadores de 105 MW la hidroeléctrica de Molino (Amaluza) que es la segunda central más grande del Ecuador, adicionalmente en el año 1991 se instaló 5 generadores de 115 MW que conjuntamente con el dragado de sedimentos se precautela su operación a lo largo de su vida útil, esto debido a que por el largo tiempo que se encuentra en operación la central enfrenta problemas de acumulación de sedimentos.

Por otro lado, en el año 2010 entro en operación con 2 generadores de capacidad de 160 MW la hidroeléctrica Mazar ubicadas aguas arriba de la central Molino, la cual retiene sedimentos para brindar continuidad a la operación del embalse Amaluza y por lo que se considera conveniente la regulación de estos volúmenes de agua para garantizar su funcionamiento y su producción eléctrica (HIDROPAUTE, 2006).

Mediante una revisión bibliográfica no se encontraron aplicaciones documentadas del modelo HEC-ResSim, o de herramientas similares, en embalses de cuencas reguladas con topografía de montaña, por lo tanto, el propósito de este estudio es obtener alternativas para el buen manejo y aprovechamiento de estos volúmenes de agua para la generación eléctrica a través del programa computacional HEC-ResSim. Cabe señalar que se ha observado que el embalse Mazar almacena gran cantidad de agua y opera con pocas unidades para la generación eléctrica, por lo cual es imperativo regularlo para que el volumen excedente de Mazar se

conserve, a la espera que el embalse Amaluza lo requiera, para así obtener una buena producción eléctrica en la central Molino debido a que esta central es una de las principales fuentes de energía eléctrica al país, Por esta razón, este proyecto se muestra como un estudio innovador en esta temática

### **Definición de la zona de estudio**

La cuenca hidrográfica del río Paute se encuentra localizada en la región austral de Ecuador en los Andes centro sur, denominado también como la hoya del Paute, ubicado entre las cordilleras Oriental de los Andes (Este) dividiendo de esta manera al Oriente con la Sierra y Occidental de los Andes al (Oeste) separando la Sierra con la Costa , entre los Nudos de Curiquingue (Norte) que limita la hoya de Cañar con la de Paute y de Portete (Sur) que divide la hoya de jubones con la Paute (Donoso Correa, 2002).

El área aproximada de la cuenca del río Paute es de 5.000 Km<sup>2</sup>, con una delimitación política y administrativa comprendida entre un 74,82% en la provincia del Azuay, un 13,31% en la provincia del Cañar, un 11,57% en la provincia de Chimborazo y el 0,28% restante en la provincia de Morona Santiago. Esta cuenca hidrográfica forma parte de la cuenca Santiago-Namangoza la misma que constituye parte de la cuenca del río Amazonas (Donoso Correa, 2002).

El río paute a lo largo de todo su afluente es aportado por una serie de ríos que conforman subcuencas específicas, a continuación, en la tabla 1 se expresan las subcuencas altas, medias y bajas que la conforma con su respectiva área.

*Tabla 1: Subcuencas, altas, medias y bajas del área de estudio.*

<b>CUENCA DEL RIO PAUTE</b>	
<b>CUENCA ALTA DEL RIO PAUTE</b>	
<b>SUBCUENCA</b>	<b>AREA (Km2)</b>
Rio Yanuncay	412
Rio Tomebamba	383
Rio Tarqui	456.6
Rio Machángara	293.6
Rio Sidcay y microcuencas adyacentes	48.5
<b>TOTAL, CUENCA ALTA</b>	<b>1593.7</b>
<b>CUENCA MEDIA DEL RIO PAUTE</b>	
<b>SUBCUENCA</b>	<b>AREA (Km2)</b>
Rio Burgay	455
Rio Jadán	338
Rio Gualaceo	991
Microcuencas adyacentes	160.2
<b>TOTAL, CUENCA MEDIA</b>	<b>1944.4</b>
<b>CUENCA MEDIA DEL RIO PAUTE</b>	
<b>SUBCUENCA</b>	<b>AREA (Km2)</b>
Rio Culticay	43.6
Rio Collay	241.8
Rio Pindilig	117.4
Rio Mazar	166.9
Rio Juvál	418
Rio Pulpito	147.4
Microcuencas adyacentes	513
<b>TOTAL, CUENCA BAJA</b>	<b>1648.1</b>
<b>AREA TOTAL DE CUENCA DEL RIO PAUTE</b>	<b>5186.2</b>

Fuente: Elaboración propia.

El embalse de mazar se encuentra ubicado en los límites de Azuay y Cañar, en el km 105 de la vía Cuenca-Paute-Guarumales aproximadamente, está constituido básicamente por una presa de enrocado con cara de hormigón de 166 metros de altura y una central subterránea al pie de la presa que aloja dos unidades de generadores eléctricos de 80 Megavatios (Espinoza, 2008), al inicio del embalse está en el canto Guachapala de la provincia del Azuay (752091.1, 9694633, 2187) y el final del embalse se encuentra en el límite de Azuay y Cañar (764300.5,

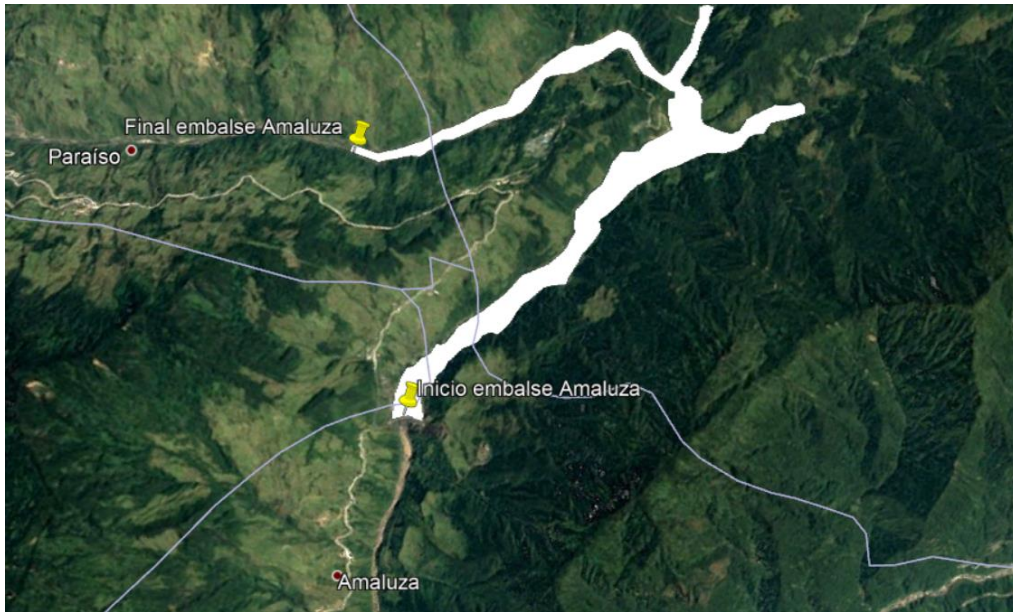
9712647.7, 2106), teniendo una longitud de embalse aproximada de 27.756 km (ilustración 1), datos obtenido a través del software Google Earth Pro.



*Ilustración 1. Embalse Mazar.*

*Fuente: Google Earth Pro*

El embalse de Amaluza o conocido también como la presa Daniel Palacios se encuentra en los límites de la provincia del Azuay, Cañar y Morona Santiago, y está constituido básicamente por una presa tipo arco de gravedad y tiene una altura de 170 m, posteriormente, a 8 km en línea recta se encuentra la casa de máquinas en caverna albergando 10 unidades generadoras tipo Pelton, diseñadas para un caudal de  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  (EP, 2013), al inicio del embalse está ubicado en la provincia de Cañar (768848.4, 9715159, 2049) y el final del embalse se encuentra en el límite de Azuay y Morona Santiago (770575.2, 9713096.7, 1978), con una longitud de embalse aproximada de 8.346 km (ilustración 2), datos obtenidos a través del software Google Earth Pro.



*Ilustración 2. Embalse Amaluza.*

*Fuente: Google Earth Pro*

## **X. Justificación**

Entre las principales fuentes generadoras de energía eléctrica del país destaca la Hidroeléctrica Mazar, considerada como la segunda etapa del desarrollo del proyecto Paute Integral, este proyecto además de contribuir con la producción de energía eléctrica también ayuda con la retención de sedimentos que pone en riesgo la vida útil de la central hidroeléctrica Daniel Palacios (EP, 2013).

Por tales razones se origina el presente trabajo de investigación, con el objetivo principal de optimizar los recursos hídricos destinados a la generación de energía eléctrica mediante la aplicación del software HEC-HMS, a partir de un análisis hidrológico de las subcuencas que influyen en el embalse Mazar tanto en la entrada y la salida del mismo para obtener caudales de aporte en una serie de tiempo,

Adicionalmente se lo completará realizando una modelación numérica del balance de masas de agua de los embalses Mazar y Amaluza en el programa computacional HEC-ResSim para obtener el comportamiento de estos volúmenes de regulación durante periodos de operación definidos y de esta manera generar alternativas de máxima eficiencia en la generación eléctrica en lo que respecta a los volúmenes teóricos disponibles en los cuerpos de regulación.

## **XI. Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar y aplicar modelos computacionales para la optimización del volumen de regulación de agua en el embalse Mazar y Amaluza en la provincia del Azuay-Ecuador

### **Objetivos Especificos**

- ✓ Aplicar sistemas de información geográfica para obtener los parámetros geomorfológicos de la cuenca hidrográfica de estudio.
- ✓ Emplear el software HEC-HMS para la obtención del escurrimiento superficial en una serie de tiempo en la zona de estudio.
- ✓ Desarrollar la calibración y validación del modelo HEC-HMS empleando el software Rstudio.
- ✓ Emplear el software HEC-ResSim para determinar la generación eléctrica de la central Mazar y Molino a partir de sus especificaciones técnicas de operación.
- ✓ Determinar posibles alternativas para la optimización de los volúmenes de agua en el embalse de Mazar y Amaluza.

## **XII. Marco metodológico**

El marco metodológico tiene como objeto presentar un flujo de actividades y herramientas necesarias para el análisis, así como también el estudio de la cuenca con el fin de disponer de resultados relevantes, en la gestión de toma de decisiones para la optimización del volumen de agua en los embalses de Mazar y Amaluza. Entonces el presente trabajo está compuesto por:

### **Procesamiento de datos**

Los datos son obtenidos y registrados de diferentes maneras, desde la lectura de medidores simples hasta toda una diversidad de sistemas automatizados de recopilación, transmisión y archivado de datos. Dado el avance de la tecnología en la actualidad, se considera más importante que los sistemas de proceso y control de calidad de los datos estén bien organizados y sean adecuadamente comprendidos por quienes se encargan de su recopilación y de su utilización (Graneri, 2014).

Para ejecutar el modelo hidrológico se cuenta con datos de las estaciones hidrometeorológicas, topografía de la cuenca y la cobertura vegetal de la zona. Los datos hidrometeorológicos de precipitaciones y caudales son facilitados por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), de igual manera para la optimización de volúmenes de agua en el embalse se cuenta con datos de caudales al ingreso, caudales de salida del embalse, curvas de descarga y batimetría facilitados por la empresa CELEC EP (Corporación eléctrica del Ecuador).

Para la obtención de la cartografía base se empleará la plataforma del IGM (Instituto Geofísico Militar) y el sitio web ALOS (Advanced Land Observation Satellite) PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar) el cual provee imágenes DEM satelitales con diversas resoluciones y coberturas.

Los datos recolectados de las diferentes instituciones se los agrupara según el estudio que se desea realizar, con la finalidad de contar con las variables necesarias para que el análisis se lo realice de una manera ordenada y de fácil entendimiento, así obtener resultados válidos.

Cabe recalcar que los datos de las batimetrías de los embalses proporcionados por la empresa CELEC juegan un papel importante en el desarrollo de la presente investigación ya que a partir de estos es posible obtener las curvas de capacidad, volúmenes del embalse en función de los sedimentos depositados. En el embalse Mazar la batimetría se la realizo a través de sondeos electrónicos con una ecosonda de Raytheon mientras que el posicionamiento se llevó a cabo con un GPS donde se obtuvo como resultado los perfiles transversales del embalse, los cuales simultáneamente fueron determinados en la restitución Aero fotogramétrica constituyendo los originales, a consecuencia de los cuales se establece el nivel de sedimento y el volumen retenido (Jerves, Informe sobre la sedimentación en el embalse Mazar, 2013).

En el embalse Amaluza la batimetría se los realizo con sondeos mecánicos y electrónicos mediante el levantamiento de los perfiles transversales que se ubican antes del llenado del embalse (Jerves, Informe sobre la sedimentacion del embalse Amaluza, 2013).

### **Análisis de la Cartografía**

La cartografía conjuntamente con la evolución de la tecnología de los sistemas de información geográfica se ha establecido como una excelente herramienta dado que facilitan comparar, escoger y tomar decisiones en función de información actualizada e integral (Fallas, 2003).

La información cartográfica obtenida se encuentra en formato shape file (SHP) para posteriormente ser procesada en el software ArcGIS, lo cual brindará como resultado la información cartográfica necesaria para la modelación hidrológica de la cuenca, con lo que será

posible disponer de las características físicas de la cuenca como: área de la cuenca, longitud del cauce principal, pendiente de la cuenca, perímetros, ancho de la cuenca, orientación, pendiente de la cauce principal, factor de forma de Horton, coeficiente de compacidad, cota mayor-menor de la cauce y de la cuenca, corrientes tributarias, orden de la cuenca.

### **Estudio de la cuenca hidrológica**

Actualmente este estudio toma parte fundamental en los proyectos de ingeniería y obras hidráulicas, por lo que se han desarrollado varios programas computacionales para la simulación de análisis hidrológicos, optimización de volúmenes de agua de embalse, evaluación de zonas de inundación, etc., ya que mediante este análisis se puede evaluar la escorrentía a través de registros históricos, obtener caudales sintéticos, encontrar el funcionamiento de la cuenca y balance hídrico (William, y otros, 2013). De igual manera, a partir del análisis cartográfico se obtendrá los parámetros morfológicos de la cuenca.

Por tanto, se procederá a realizar el estudio hidrológico de la cuenca empleando el software (HEC-HMS) el cual está sujeto a un procedimiento necesario para simulación del ciclo hídrico que incluye parámetros geomorfológicos y físicos de la cuenca dando como resultado una modelación que se acerque a la realidad, estos hacen referencia a que se tendrá la escorrentía superficial.

### **Alternativas para la optimización del volumen de agua de los embalses**

La aplicación del modelo de optimización permite establecer estrategias óptimas de operación restringiendo el nivel del agua almacenada al inicio y al final de una serie de tiempo hidrológico en el nivel mínimo técnico (María, Carlos, & Santiago, 2007).

Por consiguiente, se ejecutará modelaciones en el programa HEC-ResSim que ayudaran en la predicción del comportamiento del embalse en una serie de tiempo y de acuerdo a esto

determinar los niveles de agua durante la operación, dichas modelaciones incluyen parámetros como caudales al ingreso del embalse, salidas controladas, salidas no controladas y niveles de almacenamiento, los cuales se obtienen en el Procesamiento y análisis de la información.

Debido a la variabilidad del régimen de los caudales en el río y las diferentes necesidades de energía eléctrica a generar, los niveles en el embalse pueden fluctuar entre los rangos definidos por las envolventes mínima y máxima de las operaciones óptimas establecidas por los volúmenes de espera y reserva, esto permitirá generar propuestas de optimización de volumen de agua en los embalses en función del análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca. Cabe recalcar que estas propuestas serán generadas exclusivamente para el uso hidroeléctrico, ya que la continuidad de este servicio es primordial para la población servida.

## **Capítulo 1: Marco Teórico**

### **1.1 Procesamiento y análisis de la información**

En este capítulo se realizará una revisión bibliográfica de los conceptos, metodologías e información obtenida de las diferentes entidades para su posterior selección, de esta manera aplicarlos a nuestro modelo.

#### **1.1.1 Información climatológica.**

La climatología es la encargada de estudiar los fenómenos meteorológicos y sus variaciones a lo largo del tiempo. De manera general el área de estudio presenta un relieve montañoso que varía desde los 1600 msnm (Guarumales) a los 3870 msnm (Patual), debido a esto posee una diversidad de climas que van desde el frío a subcálido y muy húmedo a seco, por otro lado, en esta zona también predominan los suelos arcillosos. (HIDROPAUTE, 2006).

Por lo general la temperatura máxima promedio en la represa Mazar es de 31°C en julio y de 3°C en enero, posee un clima continental en verano ya que es cálido y seco, mientras que en inviernos es frío y húmedo. La temperatura anual en Mazar es de 21° y la precipitación media anual es de 216 mm, la humedad media es de 44% y el índice UV es de 5.

En la represa Amaluzza cuenta con una temperatura máxima promedio es de 17°C en noviembre y mínima promedio de 12°C en junio, tiene un clima ecuatorial por lo general es caluroso, húmedo y lluvioso todo el año, la precipitación anual es de 1626 mm, la humedad media es de 86% y el índice UV es 4.

#### **1.1.2 Información hidrológica.**

De acuerdo a la organización meteorológica mundial la hidrología es la ciencia que trata de los procesos que rigen el agotamiento y recuperación de los recursos hídricos en áreas continentales de la tierra y en las diversas fases del ciclo hidrológico (Aranda D. F., 1984).

La información hidrológica está conformada por varios elementos que integran y estandarizan el acopio, registro, manejo y consulta de datos (base de datos), con la finalidad de disponer de registros accesibles de lluvias y caudales, estos registros se obtienen a través de las diferentes estaciones (Aranda D. F., 1984). Por ello es necesario mencionar que para realizar este estudio hidrológico se tendrá los siguientes datos que fueron obtenidos a través de los anuarios de INAMHI.

#### ***1.1.2.1 Precipitación total mensual.***

La precipitación es uno de los fenómenos atmosféricos que se puede presentar en la naturaleza en forma de agua líquida o sólida (nieve o granizo), este fenómeno se debe a la interacción de masas de aire frío y cálido, donde la masa de aire cálido asciende sobre la fría debido a que es más densa y dicho ascenso provoca que el vapor de agua se condense produciendo pequeñas gotas de agua (Aranda D. F., 1984).

Las precipitaciones mensuales en la cuenca se las analiza con el objetivo de observar el comportamiento de cualquier estructura hidráulica, motivo por el cual se generó el mapa base de las cuencas hidrográficas (ilustración 3), a través de las cartas geográficas del Instituto Geográfico Militar.



*Ilustración 3. Mapa de la cuenca del Rio Paute*

*Fuente: Elaboración propia*

En la ilustración 3 se presenta la cuenca del rio paute con respectivas subcuencas, además se puede observar el cauce principal denominado rio Paute.

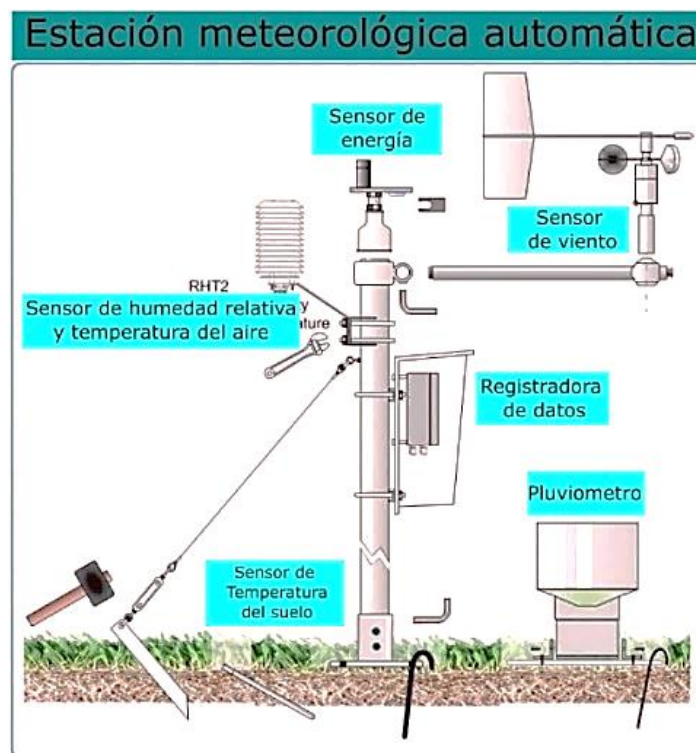
### ***1.1.2.2 Estaciones meteorológicas***

Es posible definir a las estaciones meteorológicas como el espacio físico en donde se encuentran instalados dispositivos destinados a recoger diversos datos relacionados con las variables atmosféricas, considerados de interés en el campo de la meteorología, como se observa en la Figura 1.

Existen diversos tipos de estaciones meteorológicas entre las cuales se describe las siguientes:

**Convencional:** En este tipo de estaciones los datos se toman de manera manual y se registra en una libreta para posteriormente enviar a otros técnicos que procesan estos datos levantados.

**Automática con telemetría:** Esta estación recoge los datos de manera automatizada mediante diferentes tipos de sensores y los envía a centros de recepción en donde se procesan los datos automáticamente.



*Figura. 1. Estación Meteorológica.*

*Fuente: (Tito, s.f.)*

La figura 1 representa los instrumentos de medición más comunes en las estaciones meteorológicas. Las estaciones meteorológicas generalmente están compuestas por:

**Barómetro.** El cual calcula la presión atmosférica.

**Sensor de Temperatura.** Este sensor mide temperatura ambiental, así como caracteriza las temperaturas mínimas y máximas.

**Sensor de Humedad relativa.** Registra la humedad relativa a lo largo del día.

**Pluviómetro.** Da como resultados las medidas de alturas de precipitaciones pluviales o lluvia y su unidad de medida es el milímetro(mm).

**Evaporímetro.** Este sensor mide la cantidad de vapor de agua que sube hacia la atmosfera dentro de un límite de tiempo.

**Sensor de viento.** Mide las velocidades y dirección que tienen los vientos en un lapso de tiempo. (Alvaro Brenes, 2012)

Todos los valores recolectados por las estaciones deberán ser procesados en sistemas de procesamiento de información, que por lo general se encuentran en el mismo equipamiento para posteriormente ser almacenados en programas computacionales.

### ***1.1.2.3 Estaciones Hidrológicas***

Las estaciones hidrológicas se caracterizan por poseer un comportamiento hidrológico de los suelos, sedimentos, y de cuerpos de agua, es por esto es imposible confundirlas con las estaciones meteorológicas o climáticas (Geoge, 2000)

Una estación hidrológica puede contener diferentes tipos de aparatos de medición como:

**Estación Limnigráfica:** Es aquella en donde se mide el nivel de una corriente hídrica mediante un aparato que registra el nivel y grafica una curva llamada limnigrama.

**Estación Limnimétrica:** Estación capaz de medir el nivel con el que cuenta una corriente hídrica por medio de un aparato cuya unidad de medida es el centímetro (cm) y mide

la altura del agua, sin registrarla, ya que debe ser tomada y anotada por una persona (IDEAM Instituto de Hidrología, 2019).

Para el análisis hidrológico se empleará estaciones pluviométricas, de las cuales se obtendrá un registro de precipitaciones durante un determinado periodo de tiempo.

#### ***1.1.2.4 Caudal del cauce***

Cuando se observa un río como primera impresión se tiene a la fuerza de las corrientes, dimensiones de su cauce y el volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en una unidad de tiempo establecido denominado caudal, el cual se determina multiplicando el área de la sección transversal por la velocidad de la corriente (Organization, 2012). En el presente estudio se considera imprescindible la disposición de datos de los caudales dada su importancia en la construcción de proyectos hidráulicos.

### **1.1.3 Información de los embalses**

Se define a un embalse como un gran depósito de agua, en el cual el cuerpo de agua es obstaculizado por una presa, para diferentes fines, en este caso con el objetivo de la generación de energía eléctrica (Caro, 2002).

#### ***1.1.3.1 Clasificación de embalses.***

Según su origen los reservorios se pueden clasificar en: naturales y artificiales.

##### ***Embalses naturales.***

Estos son provocados por derrumbes o acumulaciones de hielo, generalmente tienen una vida corta.

### ***Embalses artificiales.***

Son consecuencia de la construcción de una represa. Este tipo de embalses son empleados con los siguientes objetivos: generación de energía, riego, control de inundaciones, control de sedimentos, navegación, entre otros.

Los embalses están compuestos por (ilustración 4):

**Presas:** es la estructura que interrumpe el paso de agua, esta estructura debe ser impermeable y sumamente estable.

**Aliviadero:** La función que cumple esta estructura es la de descarga de excedentes presentes en el embalse.

**Obras de toma:** Son un conjunto de estructuras integradas por: la toma, un conducto a través de la presa y una estructura de salida. Estas obras están destinadas a conducir el agua a los sistemas de distribución.



***Ilustración 4. Composición de los embalses.***

***Fuente: (Quizhpi C., Ecuador Central Hidroeléctrica Paute 2018 DJI Phantom Drone 4k Tourist Ecuador***

***AMA LA VIDA, 2018)***

### ***1.1.3.2 Características de los embalses.***

Los embalses presentan varias características las cuales se indicarán a continuación:

#### **Curvas de áreas y capacidades.**

Las curvas de áreas y capacidades se las denomina también como curvas cota-área-volumen y ayudan a graficar volúmenes de capacidad de almacenamiento y áreas de inundación en diferentes alturas en una presa.

#### ***Niveles característicos de los embalses.***

**Nivel mínimo:** Este es el nivel más bajo que los embalses pueden alcanzar y a su vez es el nivel mínimo de la toma, ubicado en la menor cota.

**Nivel mínimo operacional:** En este nivel las estructuras que integran la presa operan de manera irregular, es decir no pueden operar de forma adecuada.

**Nivel máximo operacional:** Al sobrepasar este nivel se presenta ya exceso de agua el cual es eliminado por medio de vertederos.

**Nivel del vertedero:** Si existe un vertedero libre, el nivel de la solera es igual al nivel máximo operacional.

**Nivel para la avenida de proyecto:** Es el máximo nivel que se alcanza en el embalse, considerando su acción laminadora, al momento que recibe la avenida de proyecto.

### ***1.1.3.3 Volúmenes característicos de los embalses.***

#### **Volumen de sedimentos.**

Este volumen se determina mediante estudios hidráulicos, fluviales y transporte de sedimentos. En los diseños se debe considerar que exista suficiente espacio para el

almacenamiento de sedimentos y así asegurar el correcto funcionamiento de la presa durante su vida útil.

**Volumen muerto.**

Se define como el volumen de almacenamiento hasta que alcance el nivel mínimo.

**Volumen útil de almacenamiento.**

Es el volumen que se utiliza para abastecer las demandas y pérdidas de agua durante el funcionamiento del embalse. Existen casos en los que el volumen útil es menor al requerido lo que provoca que no exista un adecuado funcionamiento del embalse para abastecer la demanda durante todo el tiempo.

**Volumen de laminación.**

Este volumen se lo utiliza para reducir el caudal vertido en las avenidas para limitar los daños aguas abajo.

***1.1.3.4 Caudales característicos de los embalses.***

**Caudal firme.**

Este es el máximo caudal que se puede retirar del embalse en un período crítico. Es considerado como un periodo crítico anual hidrológico en el cual se registra el volumen mínimo aportado.

**Caudal regularizado.**

Es el caudal que se puede retirar del embalse durante todo el año hidrológico.

#### **1.1.4 Información de embalses de estudio**

El proyecto Paute integral permite la generación de energía eléctrica, este se compone por cuatro centrales que se abastecen del agua de la cuenca del río paute, las cuales son: Mazar, Molino, Sopladora y Cardenillo.

Esta investigación tiene como objeto el aprovechamiento del Río Paute aguas arriba del embalse Amaluza-molino, el cual cuenta con un volumen total de 410 hm<sup>3</sup> y 390 hm<sup>3</sup> de almacenamiento útil y un volumen muerto capaz de almacenar sedimentos durante una vida útil (50 años), además tiene una longitud aproximada de 31 km, un caudal de ingreso promedio anual de 120m<sup>3</sup>/s, potencia de 160 MW y una producción anual de 800Gwh/año (Cedillo Galarza & Jara Cárdenas, 2018).

En la ilustración 5 y 6 se aprecia el embalse y la presa que la conforman.



*Ilustración 5 Embalse Mazar*

**Fuente:** *(Quizhpi C., Amazing 4K Drone Footage of Mazar Dam in Ecuador!, 2018)*



**Ilustración 6. Represa y embalse Mazar.**

**Fuente:** *(Quizhpi C., Amazing 4K Drone Footage of Mazar Dam in Ecuador!, 2018)*

El embalse Amaluza pertenece a la central “Molino” la cual es la primera etapa de proyecto Paute integral, este embalse tiene una capacidad de almacenamiento de 120 hm<sup>3</sup> de los cuales 100hm<sup>3</sup> de almacenamiento es útil, también cuenta con una tasa anual de sedimentos de 2.252 Hm<sup>3</sup>, Caudal de ingreso promedio anual de 110m<sup>3</sup> /s, 1100 MW de potencia y una producción anual de 4900GWh/año.

Los levantamientos batimétricos (perfiles longitudinales) de los embalses MAZAR y AMALUZA se obtienen a partir del informe anual de batimetría realizado por CELEC EP, con el objetivo de determinar el volumen de sedimentación total presente en el embalse y determinar la distribución de solidos a lo largo del embalse. A si mismo los datos de serie de tiempo de caudales, volúmenes de almacenamiento son brindados por CELEC EP.

En la ilustración 7 se observa la presa y el embalse que la conforma.



*Ilustración 7. Represa y Embalse Amaluza.*

*Fuente: (Quizhpi C., Ecuador Central Hidroeléctrica Paute 2018 DJI Phantom Drone 4k Tourist Ecuador AMA LA VIDA, 2018)*

## **1.2 Estudio hidrológico**

Un estudio hidrológico es empleado para realizar construcción de obras hidráulicas, estudios para obtención de parámetros geomorfológicos, caudales de aporte y la construcción de modelos computacionales.

### **1.2.3 Estudio hidrológico de cuencas.**

Un estudio hidrológico se emplea para determinar parámetros geomorfológicos, tiempos de concentración, duración e intensidad de lluvia y cálculo de caudales. Es por ello que para realizar estos estudios es necesario tener presente las limitaciones de desarrollo de las metodologías (Rio, 2016).

En la actualidad se utilizan programas computacionales para el estudio hidrológico de cuencas, es por ello que se empleará el SIG (Sistemas de Información Geográfica) para la obtención de los parámetros geomorfológicos de la cuenca y el software HEC-HMS esto

permitirá determinar el comportamiento de la cuenca en una serie de tiempo y así observar el comportamiento del embalse para su posterior regulación y almacenamiento.

Del análisis geomorfológico se tendrán resultados como:

### **1.2.3.1 Área.**

Está definida como una proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de esorrentía dirigida directa o indirectamente a un mismo cauce natural, este parámetro es probablemente la característica geomorfológica más importante ya que a partir de este se define el tamaño de la cuenca, para lo cual se toma como referencia la clasificación de la tabla 2 (Gálvez, 2011).

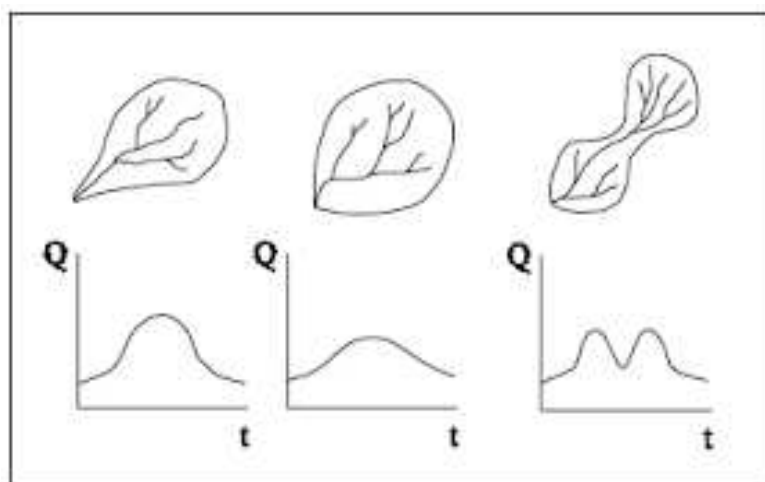
*Tabla 2: Clasificación del tamaño de la cuenca hidrográfica.*

<b>Superficie de la cuenca (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Tipo de cuenca</b>
<25	Muy pequeña
25-250	Pequeña
250-500	Intermedia-Pequeña
500-2500	Intermedia-Grande
2500-5000	Grande
>5000	Muy grande

*Fuente: (Aranda C. , 1998)*

### **1.2.3.2 Parámetro de forma de la cuenca.**

Es la configuración geométrica de la cuenca tal como está proyectada sobre el plano horizontal, la forma indica el tiempo de respuesta de la cuenca, es decir, al tiempo de recorrido de las aguas a través de la red de drenaje y a la vez la forma del hidrograma resultante de una precipitación dada (Gálvez, 2011). En la Figura 2 se observa los diferentes hidrogramas en función de la forma de la cuenca.



*Figura. 2. Forma de la cuenca de drenaje y su relación con un hidrograma de precipitaciones.*

*Fuentes: (Bizzotto, 2016)*

Para determinar la forma de una cuenca se utiliza el índice de Gravelius o índice de compacidad:

### **Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc).**

El índice propuesto por Gravelius define la forma de la superficie de la cuenca, teniendo influencia sobre la esorrentía y el resultado del hidrograma de precipitación. El coeficiente de compacidad es adimensional y permite relacionar el perímetro y el área de la cuenca (Sellers Chester, 2017).

$$kc = 0.2821 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1.1)$$

Donde:

kc = Coeficiente de Campacidad

P = Perimetro de la cuenca

A = Área de la cuenca

Después de la resolución de la ecuación antes mencionada se observa en la tabla 3 la clasificación la cuenca:

*Tabla 3: Índice de capacidad.*

<b>Índice (kc)</b>	<b>Descripción</b>
1 - 1,25	Redonda - óvalo redondo
1,25 - 1,5	Óvalo redondo - óvalo oblonga
1,5 - 1,75	Óvalo oblonga - rectangular oblonga
> 1,75	Rectangular - Muy lobuladas

*Fuente: (Sellers Chester, 2017)*

#### **Factor de forma de Horton.**

Este factor establece una relación entre el ancho promedio de la cuenca y la longitud de la cuenca, es decir, es la longitud del cauce más largo desde su punto de interés hasta la cabecera de la cuenca, el ancho medio se calcula con el área de la cuenca y la longitud de la cuenca. Cabe recalcar que una cuenca con factor de forma bajo esta menos relacionada a las crecientes que otra del mismo tamaño, pero con mayor factor de forma (Sáenz, 1995).

$$kf = \frac{B}{L} \quad (1.2)$$

$$B = \frac{A}{L} \quad (1.3)$$

$$kc = \frac{A}{L^2} \quad (1.4)$$

Donde:

kf = factor de forma

B = Ancho medio

A = Área de la cuenca

L = Longitud de la cuenca

En la tabla 4 se observa la clasificación de cuenca empleando el coeficiente de forma.

**Tabla 4: Coeficiente de forma**

<b>Índice (kf)</b>	<b>Característica</b>
< 0,22	Muy alargada
0,22 - 0,30	Alargada
0,30 - 0,37	Ligeramente alargada
0,37 - 0,45	Ni alargada ni ensanchada
0,45 - 0,60	Ligeramente ensanchada
0,60 - 0,80	Ensanchada
0,80 - 1,12	Muy ensanchada
> 1,20	Rodeando el desagüe

*Fuente: (Sellers Chester, 2017).*

### **1.2.3.3 Longitud del cauce principal.**

Es la distancia equivalente que recorre un río entre el punto de desagüe aguas abajo y el punto de mayor distancia topográfica aguas arriba, o también la distancia del afluente donde van a drenarse todos los cauces o quebradas (Gálvez, 2011).

### **1.2.3.4 Longitud de la cuenca o longitud axial.**

Es la distancia considerada en línea recta desde el punto de nacimiento de río principal considerando o también desde la divisoria hasta el punto más bajo de la cuenca o punto de

interés del análisis de la cuenca, a esta línea se considera como el eje principal de la cuenca (Sivisaca, 2011).

#### ***1.2.3.5 Perímetro.***

Es la longitud de la línea divisoria de la cuenca, es un parámetro importante ya que conjuntamente con el área ayuda a la obtención de la forma de la cuenca.

#### ***1.2.3.6 Cota mayor de la cuenca.***

Es la altura mayor sobre el nivel del mar donde se encuentra la divisoria de la cuenca

#### ***1.2.3.7 Cota menor de la cuenca.***

Es la altura menor sobre el nivel del mar, es decir es el punto desde donde se va realizar el análisis de la cuenca.

#### ***1.2.3.8 Cota mayor del cauce.***

Es la elevación del punto más alto del cauce principal.

#### ***1.2.3.9 Cota menor del cauce.***

Esta elevación coincide con la cota menor de la cuenca.

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

Es un valor representativo del cambio de elevación de cuenca hidrográfica. Este valor es primordial ya que controla la mayor parte de la velocidad con la que se da la escorrentía superficial y afecta al tiempo que le lleva al agua lluvia para concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenaje de la cuenca.

El método más empleado para la obtención de la pendiente es el de las cuadrículas vinculadas a una vector, este método trata de determinar la distribución porcentual de las

pendientes del terreno por medio de una muestra estadística de las pendientes normales a las curvas de nivel, de un número grande de puntos dentro de la cuenca (Sáenz, 1995).

A continuación, en la tabla 5 se expresa la clasificación de la pendiente media de la cuenca.

*Tabla 5: Tipo de pendiente*

<b>Tipo de pendiente</b>	<b>Porcentaje %</b>
Plano	0-2
Suave	2-5
Moderadamente Ondulado	5-10
Ondulado	10-15
Fuertemente Ondulado	15-45
Montañoso	45-70
Escarpado	70-100

*Fuente: (Ramos, 2019).*

#### ***1.2.3.11 Pendiente del cauce principal.***

De este valor depende la velocidad de escurrimiento de la cuenca, a mayor pendiente mayor velocidad, la pendiente media es la diferencia total de elevación del lecho del río dividido por su longitud entre puntos (Sáenz, 1995).

$$P_c = 100 * \frac{C_{max} - C_{min}}{L_c} \quad (1.5)$$

*Donde:*

*P<sub>c</sub> = Pendiente de la cause*

*C<sub>max</sub> = cota mayor*

*C<sub>min</sub> = cota menor*

*L<sub>c</sub> = Longitud de la cause (m)*

### ***1.2.3.12 Razón de elongación.***

Esta componente fue introducida por el Schumm en 1956, esta variable relaciona el diámetro del círculo asociado con la longitud de la cuenca, se simboliza con “Re”, este valor es adimensional ya que trata de una división entre dos longitudes y para obtener el valor de la razón de elongación se emplea la expresión siguiente (Jardí, 1985):

$$Re = 1.128 * \frac{\sqrt{A}}{L} \quad (1.6)$$

Donde:

Re = razón de elongación

A = Área de la cuenca

L = Longitud de la cuenca

Estos parámetros están fuertemente relacionados con el relieve de la cuenca, donde valores cercanos a 1 son típicos de regiones con relieve suave o bajo, pero por otro lado valores que fluctúan entre 0.5 a 0.8 están asociados a relieves fuertes y pendientes pronunciadas (Guallpa, Quito, & Adrián Culcay, 2015).

### ***1.2.3.13 Densidad de drenaje.***

Es un factor físico que representa la dinámica de la cuenca, la estabilidad de la red hidrológica y el tipo de escorrentía superficial. La densidad de drenaje es la relación de la suma de las longitudes de las corrientes entre el valor del área de la cuenca (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006).

$$Dd = \frac{Ltc}{A} \quad (1.7)$$

Donde:

Dd = densidad de drenaje

A = Área de la cuenca

Ltc = longitud total de las cauces de la cuenca

Si una cuenca se encuentra alrededor de  $0.5 \text{ km/km}^2$  implica que posee un drenaje pobre mientras que si el valor se encuentra alrededor de  $3.5 \text{ km/km}^2$  tiene un buen drenaje (Guallpa, Quito, & Adrián Culcay, 2015).

### 1.2.3.14 Curva hipsométrica.

Este parámetro representa con precisión el comportamiento general de la altitud de la cuenca y la dinámica del ciclo de erosión, también permite conocer la distribución de masas en la cuenca según la elevación de cuenca. Se representa en una gráfica área-elevación, donde simboliza el porcentaje de área acumulada para una cota determinada (Gutiérrez, 2016).

En la Figura 3 se observa los tipos de curvas hipsométricas estándar los cuales se comparan con la curva hipsométrica calculada.

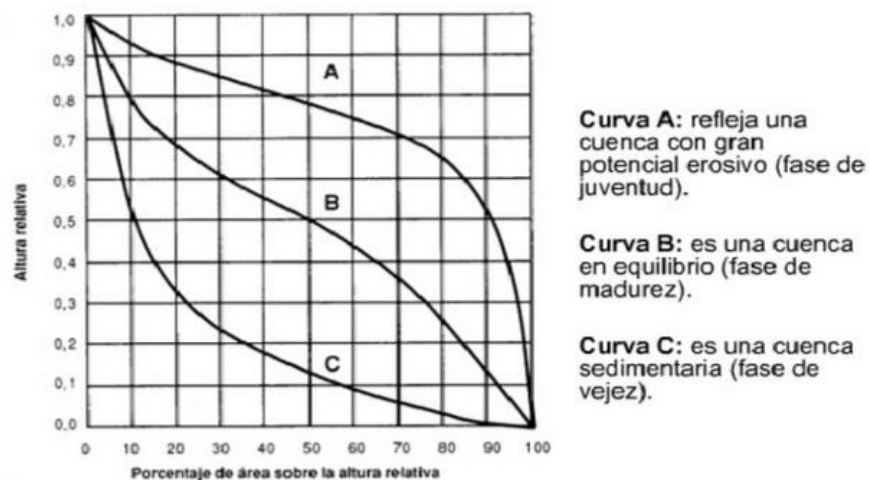


Figura. 3. Tipos de curvas hipsométricas

Fuente: (Rojas, 2015)

### ***1.2.3.15 Desnivel altitudinal.***

Este criterio se obtiene a partir de la sustracción de la cota superior y la más baja. Es decir (Ibáñez Asensio , Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2011):

$$DA = C_{max} - C_{min} \quad (1.8)$$

Donde:

CA = Desnivel Altitudinal

C<sub>max</sub> = cota mayor

C<sub>min</sub> = cota menor

Esta variable se asocia a la diversidad ecológica y climática, debido a que si en una cuenca se presenta una gran cantidad de pisos altitudinales esta es capaz de contener un mayor número de ecosistemas puesto que su precipitación y temperatura presentan modificaciones relevantes (Ibáñez Asensio , Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2011).

### ***1.2.3.16 Frecuencia altimétrica.***

Este parámetro se considera con el objetivo de describir las altitudes consecutivas, las frecuencias a cierta elevación, puntos más altos en mallas cuadradas de muestreo y alturas correspondientes de las cumbres, llanuras, etc. (Racca, 2007).

Se obtiene planimetrando en las cartas topográficas el área entre las curvas de nivel de las altitudes consecutivas, puede ser representada en km<sup>2</sup> o porcentaje, y consta de los mismos datos de la curva hipsométrica, pero plantea la variabilidad probabilística de las cotas en la cuenca (Ibáñez Asensio, 2011).

### ***1.2.3.17 Orden de las corrientes de agua.***

Representa el grado de ramificación o división de cauces dentro de la cuenca, los métodos más utilizados para esta clasificación es el método de Horton (1945) y el método de Strahler (1952) (Gálvez, 2011).

El método Horton clasifica las corrientes como se observa en la tabla 6.

***Tabla 6: Clasificación de la corriente.***

<b>Orden de las corrientes</b>	<b>Característica</b>
Primer orden	Pequeños canales que no tiene tributarias
Segundo orden	Cuando dos corrientes de primer orden se unen
Tercer Orden	Cuando dos corrientes de segundo orden se unen
Orden n+1	Cuando dos corrientes de orden n se unen

***Fuente: (Sáenz, 1995).***

El método de Strahler es similar al de Horton con la diferencia que este menciona que un mismo río puede tener segmentos diferentes a lo largo de todo su curso, en función de los afluentes que se unen en cada tramo y el orden de la corriente no se incrementa cuando a un segmento de un determinado orden se junta con otra de menor orden (Gálvez, 2011). Este método se emplea para la obtención del orden de la cuenca en los sistemas de información geográfica.

### ***1.2.3.18 Caudal de escorrentía superficial.***

Es la relación entre el volumen de agua escurrida superficialmente y volumen de agua generado por las precipitaciones, el coeficiente de escorrentía depende de varios elementos, así como también no es constante en un área determinada ni durante una sola lluvia (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

Uno de los métodos más empleados de los modelos prácticos de infiltración es el del servicio de conservación de suelos de los estados unidos (SCS), este método asume como hipótesis de que la escorrentía acumulada en una parte de la cuenca es a la infiltrada acumulada, a la vez descontando la fracción necesaria para que se produzca el encharcamiento y asumiendo una relación media experimental entre el umbral de escorrentía y la máxima infiltración potencial. Se aplica la siguiente ecuación (Montserrat Ferrér, 1995):

$$Q = \frac{(P-0.20S)^2}{P+0.8S} \quad (1.9)$$

Donde:

Q = Caudal de esconrentia superficial

P = Precipitación

S = Maxima infiltracion potencial

La máxima infiltración potencial esta relaciona con un parámetro de referencia conocido como numero de curvas CN, cuyo valor se encuentra en 0 a 100

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1.10)$$

Donde:

S = Maxima infiltracion potencial

CN = Numero de curvas

El número de curvas es deducido del parámetro de umbral de escorrentía, este valor depende del uso de suelo, las características hidrológicas, la pendiente del terreno y el tipo de

suelo.

$$CN = \frac{5000}{(50 - P_0)} \quad (1.11)$$

Donde:

CN = Numero de curvas

$P_0$  = Umbral de escorrentia

Para la obtención del valor del umbral de escorrentía debe estar clasificado el suelo en cuatro grupos como estable SCS y luego se observa en la tabla 7 el valor del umbral de escorrentía:

Tabla 7: Clasificación de suelo método SCS.




<b>Grupo hidrológico del suelo</b>	<b>Infiltración cuando están muy húmedos</b>	<b>Características</b>	<b>Textura</b>
A	Rápida	Alta capacidad de Infiltración >68 mm/h	Arenosa Arenosa-Limosa Franca
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h	Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13 mm/h	Franco-arcillosa Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa
D	Muy lenta	Capacidad de infiltración <13 mm/h	Arcillosa

**Fuente:** Grupos hidrológicos del suelo (SCS, 1964 en Bradbury et al., 2000).




### 1.2.3.19 Patrones de drenaje.

Los patrones de una red han sido definidos diferentes autores tales como (Botero, 1978), (Morisawa, 1985), (Campos Aranda, 1987), (Sanchez Velez, 1987), y (Anguilo, y otros), pero todos basados en la clasificación planteada por (Way, 1978) detallada en la tabla 8.




*Tabla 8: Patrón de drenaje.*


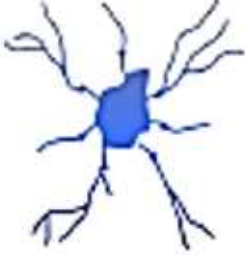

<b>Patrón de drenaje</b>	<b>Características</b>	<b>Diagramas</b>
Dendrítico	<p>Se distingue ya que posee una distribución de flujos muy parecido a las ramas de un árbol. Las corrientes fluyen hacia el cauce principal formando ángulos agudos. La disposición de los suelos varía entre graduados con existencia de rocas sedimentarias e ígneas, entre ellos, coluviones y tobas volcánicas.</p>	
Pinnado	<p>Se configura como una variación del patrón dendrítico, en el que existe un aumento en el número de afluentes, registrado regularmente en pendientes suaves. Los afluentes discurren en ángulos rectos en donde se conecta con el río principal, mientras que en los flujos nacientes de forma aguda. La estratigráfica del suelo consta de limos con una matriz homogénea originario de rocas sedimentarias o depósitos aluviales con textura fina.</p>	
Rectangular	<p>Es otra modificación del sistema dendrítico, en el que las corrientes fluyen en ángulos aproximadamente rectos hacia los ríos de mayor orden, que simultáneamente con diaclasas y fracturas en las rocas originan esquemas con formas rectangulares. Los depósitos de suelo que se localizan son rocas metamórficas y areniscas silíceas y compuestas, entre otros, dependiendo del clima.</p>	

(Continuación) Tabla 8. Patrón de drenaje.

<b>Patrón de drenaje</b>	<b>Características</b>	<b>Diagramas</b>
Angular	Es un sistema que varía entre el dendrítico y rectangular, en el cual las fracturas en las rocas modifican la trayectoria del drenaje. En las zonas de mayor elevación de la cuenca los flujos generan drásticas curvas con ángulos obtusos, donde la trayectoria está determinada por la tipología de la roca en su estructura.	
Enrejado	En este sistema la distribución de las corrientes ocurre de forma paralela y la junta con los afluentes de mayor orden generalmente forman ángulos rectos. Esto se debe a que los afluentes fluyen entre las juntas de rocas sedimentarias intercaladas, exponiendo así la estructuración de su roca madre.	
Trenzado	En este sistema los afluentes son seccionados por islas generadas regularmente por el almacenamiento de material, debido a que los sedimentos que acarrear los afluentes poseen mayor capacidad, originando un seccionamiento entre los ríos. Por lo general estos sistemas se encuentran en zonas de llanuras aluviales y deltas.	

(Continuación) Tabla 8. Patrón de drenaje.

<b>Patrón de drenaje</b>	<b>Características</b>	<b>Diagramas</b>
Desordenado	<p>En este sistema como su denominación lo señala, la trayectoria del flujo no cuenta con un modelo específico, puesto que se deriva de áreas que cuentan con una estratigrafía relativamente joven, con pendientes planas y un nivel freático considerable. Generalmente las depresiones en la cuenca son pantanosas, lacustres o llanuras aluviales.</p>	
Paralelo	<p>En este sistema las uniones de orden mayor forman ángulos similares a los de los flujos tributarios, mientras que, el flujo del cauce principal dependerá de las fallas existentes en la estratigrafía del suelo a lo largo de la cuenca. Usualmente en esta zona se encuentran materiales homogéneos, distribuidos por igual en pendientes planas o suaves.</p>	
Radial	<p>En este sistema los afluentes fluyen apenas paralela y se originan en un punto muy elevado, generalmente este tipo de sistemas se presentan en volcanes o cuerpos montañosos apartados, en los cuales fluyen ríos principales en sus bases.</p>	

<b>(Continuación) Tabla 8. Patrón de drenaje.</b>		
<b>Patrón de drenaje</b>	<b>Características</b>	<b>Diagramas</b>
Anular	Es una modificación del sistema radial, en el cual los afluentes fluyen de forma paralela y se determinan en función de fallas o pliegues concéntricos. Se forman por cerros con estratos sedimentarios o domos de granito.	
Centrípeto	Es un sistema semejante la radial, sin embargo, la trayectoria de salida del drenaje fluye hacia el interior de una depresión cerrada, cráter o terminaciones de anticlinales o sinclinales, en el cual se ha suscitado procesos erosivos.	
Artificial	Generalmente este tipo de sistemas se dan en climas húmedos o pendientes suaves, en donde a través de conducciones de agua o encauces naturales después de pretender reducir el nivel freático, no son acequias de riego en zonas áridas o semiáridas.	

**Fuente: Elaboración propia**

**1.2.3.20 Tiempo de concentración.**

Es el tiempo mínimo requerido desde el comienzo de la precipitación para que la superficie de toda la cuenca comience aportar escorrentía hasta el punto de salida o desagüe de la cuenca, debido que el tiempo de concentración depende de la longitud y de la pendiente se debe seleccionar varias cauces añadiendo siempre el método de tanteo observando la mayores longitudes de la cauces y su menor pendiente para escoger la que da el mayor valor del tiempo

de concentración (ESTADO, 2016), se aplica la siguiente fórmula para el cálculo del tiempo de concentración:

$$t_c = 0.3 * L_c^{0.76} * J_c^{-0.19} \quad (1.12)$$

Donde:

$t_c$  = tiempo de concentración

$L_c$  = longitud del cauce

$S$  = Máxima infiltración potencial

### **Método de Ven Te Chow**

Este método define al  $T_c$  como la proporción que existe entre las descargas máximas y la precipitación efectiva, es decir, los flujos de inundación se dan a causa de la lluvia efectiva, esto ocurre generalmente en cuenca urbanizadas (de Almeida, Almeida, Anache, Steffen, & Alvess Sobrinho, 2014). Se determina a partir de la ecuación siguiente:

$$T_c = 0.1602 * L^{0.64} * S^{-0.32} \quad (1.13)$$

En donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración (h)

$L$  = Longitud del cauce principal (Km)

$S$  = Pendiente promedio del cauce (m/mm)

### **Método de Témez y D.N.C**

En el año 1978 Témez estableció al tiempo de concentración como la diferencia del último tiempo del hidrograma de escorrentía superficial directa y el tiempo terminal de la

precipitación efectiva. Este método se emplea en cuencas con áreas de 1km<sup>2</sup> a 3000 km<sup>2</sup> (Diaz Delgado, Mamadou Ba, Iturbe Posadas, Esteller, & Reyna Sáenz, 1999), y se determina a partir de la ecuación:

$$T_c = 0.3 * \left[ \frac{L}{S^{0.25}} \right]^{0.76} \quad (1.14)$$

En donde:

T<sub>c</sub>= Tiempo de concentración (h)

L=Longitud del cauce principal (Km)

S= Pendiente media del cauce principal (m/mm)

### **Método de Pasini**

La ecuación de este método se utiliza principalmente en cuencas con pendientes suaves (de Almeida, Almeida , Anache, Steffen, & Alvess Sobrinho, 2014):

$$T_c = 0.108 * A^{0.333} * L^{0.5} * S^{-0.5} \quad (1.15)$$

En donde:

A=Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

T<sub>c</sub>=Tiempo de concentración (h)

L=Longitud del cauce principal (Km)

S=Pendiente promedio del cauce (m/mm)

### **Método de Ventura**

Este método se utiliza para calcular el tiempo de concentración en cuencas rurales, en base a la ecuación (de Almeida, Almeida , Anache, Steffen, & Alvess Sobrinho, 2014):

$$T_C = 4 * A^{0.5} * L^{0.5} * H^{-0.5} \quad (1.16)$$

En donde:

Tc=Tiempo de concentración (h)

A= Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

L=Longitud del cauce principal (Km)

H= Diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y salida (m)

### **Método de Giandotti**

Este método se emplea generalmente en Europa, sobre todo en Italia y para cuencas montañosas, y se obtiene con la ecuación (de Almeida, Almeida , Anache, Steffen, & Alvess Sobrinho, 2014):

$$T_C = \frac{4*\sqrt{A}+\frac{3*L}{2}}{0.8*\sqrt{Hm}} \quad (1.17)$$

En donde:

Tc= Tiempo de concentración (h)

L= Longitud del cauce (Km)

Hm= Altitud media de la cuenca (m)

A= Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

### **Método de Ramer y Kirpich**

Este método establece al  $T_c$  como el tiempo pico (Diaz Delgado, Mamadou Ba, Iturbe Posadas, Esteller, & Reyna Sáenz, 1999), y se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$T_c = 3.98 * \left(\frac{L^{0.5}}{S}\right)^{0.77} \quad (1.18)$$

En donde:

$T_c$ = Tiempo de concentración (min)

$L$ = Longitud del canal principal (Km)

$S$ =Pendiente del cauce (m/m)

### **Método de la ecuación de Retardo del SCS**

El tiempo de concentración se obtiene para cuencas rurales pequeñas en las que predomina el flujo superficial (de Almeida, Almeida , Anache, Steffen, & Alvess Sobrinho, 2014), con la ecuación:

$$T_c = \frac{100 * L_p^{0.8} * \left(\left(\frac{100}{CN}\right) - 9\right)^{0.7}}{1900 * S_o^{0.5}} \quad (1.19)$$

En donde:

$T_c$ = Tiempo de concentración (min)

$L_p$ = Longitud del cauce (pies)

$S_o$ = Pendiente promedia del cauce (%)

$CN$ = Número de curva del método SCS, adimensional.

### 1.2.3 Volúmenes de regulación y almacenamiento

Los almacenamientos tienen la función de retener agua para suministrar a la población y para la generación eléctrica, estos almacenamientos juegan un papel importante en las centrales hidroeléctricas del país, es por tal razón que se debe tener una regulación de estas masas de agua.

Para tener una capacidad útil del almacenamiento de la presa se debe realizar un estudio hidrológico, esto permitirá observar al proyecto bajo diferentes escenarios, sin descartar que la represa tenga pérdidas y volumen sobrante

Un volumen de regulaciones en un sistema de almacenamiento se lo emplea de diferentes formas, como el que está destinado a proveer suministro de agua en las horas de demanda, es decir el balance entre las necesidades de agua y la disponible.

A continuación, en la tabla 9 y 10 se expresan datos de almacenamiento y regulación de la central Amaluza y central Mazar

*Tabla 9: Volumen de regulación y almacenamiento central Amaluza.*

<b>Reservorio Amaluza</b>	
Eficiencia Equivalente del Proyecto Nte	89.58 % (Para eficiencia pond. Turb. De 92.4%)
Volumen total de agua embalsada	86.48 Hm <sup>3</sup>
Almacenamiento útil de diseño	90.00 Hm <sup>3</sup>
Almacenamiento aprovechable seguro	74.88 Hm <sup>3</sup> (a 1997)

*Fuente: (Sáenz, 1995).*

*Tabla 10: Volumen de regulación y almacenamiento central Mazar.*

<b>Reservorio Mazar</b>	
Eficiencia Equivalente del Proyecto Nte	88.78%
Volumen total de agua embalsada	410.43 Hm <sup>3</sup>
Almacenamiento útil de desafío. (inicial)	309.37 Hm <sup>3</sup>
Caudal máximo turbinable	146 m <sup>3</sup> /seg

*Fuente: (Sáenz, 1995).*

#### **1.2.4 Análisis de las series de tiempo y regulación en embalses.**

El análisis de una serie de tiempo no es más que la observación de un conjunto de datos (variables) a lo largo del tiempo, la cual puede ser diaria, semanal, trimestral o anual. Para realizar un análisis en el tiempo inicialmente se debe graficar la secuencia de los datos, esto ayudará a representar la uniformidad de los datos y al mismo tiempo la gráfica brindará una verificación de que los datos se encuentren completos o en su defecto será necesario realizar un relleno de datos.

Posteriormente se obtendrá series de tiempo de precipitación facilitados por el INAMHI de diferentes estaciones, donde se verificará que cuenten con todos los datos, empleando los diferentes programas computacionales para el estudio hidrológico de una cuenca, el análisis se realizará desde el año 2005 hasta el 2015 para poder observar el comportamiento de forma diaria y su influencia en toda la cuenca, así como su aportación al embalse.

Un embalse no es más que un depósito de agua, el cual previo a su construcción requiere el planteamiento de la finalidad para la que se emplearán estos volúmenes de agua, esto indicará que volumen de agua se va a requerir para su uso. Dicho esto, entonces el estudio que se pretende realizar es regular los volúmenes del embalse para la generación hidroeléctrica a partir de los datos fueron facilitados por CELEC EP, el cual brindó datos como niveles mínimos y

máximos de operación como se observa en la tabla 11 y 12, estos niveles ayudan a la regulación, ya que si el embalse se reduce a un nivel mínimo no brinda una operación adecuada para la generación eléctrica. Se empleará un software que proporcione una mejor regulación en los intervalos de tiempo diarios e iniciará desde del 3 de marzo del 2014 hasta el 4 de marzo del 2015.

**Tabla 11: Niveles de operación central Amaluza.**

<b>Reservorio Amaluza</b>	
Nivel máximo de operación Nmax (Recomendable)	1991 m.s.n.m.
Nivel mínimo de operación de diseño Nadmin	1935 m.s.n.m.
Nivel mínimo recomendable de operación Nmin	(Por acumulación de sedimento, especialmente en la cola del embalse, sobre los 1935 m.s.n.m.)
Nivel rodete de turbinas Ntb	1323 m.s.n.m.
Altura neta de diseño Hn	667 m. (fases AB)- 657 (fase C)
Máxima Altura Neta Hnmáx	663.28m
Mínima Altura Neta Hnmín	596.36m

*Fuente: (Sáenz, 1995).*

**Tabla 12: Niveles de operación de central Mazar.**

<b>Reservorio Mazar</b>	
Nivel máximo de operación Nmax	2153 m.s.n.m.
Nivel mínimo de operación Nmin	2098 m.s.n.m.
Nivel ponderado del Embalse Nap	2131.26 m.s.n.m.
Nivel del vertedero de descarga Nvd	2002,5 m.s.n.m.
Altura neta de diseño Hn	123 .37m, media-calculada 125.0m seleccionado para el análisis
Máxima Altura Neta Hnmáx	147.34m.

*Fuente: (Sáenz, 1995).*

### **1.3 Modelación matemática**

Una modelación matemática es aplicada como un proceso dinámico que les ayude entender cierto problema de interés, que nos permitan una comprensión profunda de las situaciones reales, pero sobre todo una posible toma de posición en la relación a los objetos de estudio (Bassanezi & Biembengut, 1997).

#### **1.3.1 Aplicación de modelos matemáticos hidráulicos e hidrológicos.**

El análisis hidrológico se realizará por medio de modelaciones, que son aplicaciones de expresiones matemáticas y lógicas para definir cuantitativamente las relaciones entre las características del escurrimiento (salida) y los factores que forman el escurrimiento (entrada), también se tiene los métodos empíricos como son los de caja negra, que son los que no tratan de modelar

##### ***1.3.1.1 Modelo matemático.***

La construcción y simulación de un modelo matemático es una herramienta que hoy en día se dispone para analizar y predecir el comportamiento de un sistema estudiado. Estos modelos están ligados a la realidad mediante procesos de abstracción e interpretación.

Los procesos de abstracción permiten encontrar los elementos de mayor importancia de un problema y sus accesorios. Para esto se debe encontrar el efecto relativo en la evolución del sistema. En cuanto a la interpretación, se puede observar la manera en que las componentes del modelo (parámetros, variables) y su comportamiento pueden estar relacionadas con las componentes, características y comportamiento del sistema real que se quiere modelar.

Un modelo de sistemas hidrológicos se define generalmente como la aplicación de expresiones matemáticas y lógicas, el cual posee varios métodos que son empíricos y otros métodos de sistemas de ecuaciones que se basan en leyes físicas y conceptos teóricos,

cualquiera de estos tipos de métodos produce salidas sin posibilidades asociadas de ocurrencia es por estos se opta por realizar modelos determinísticos (Organización Meteorológica Mundial-N, 1994).

Los modelos matemáticos se clasifican como:

***Modelos Determinísticos.***

Son modelos que ayudan a establecer relaciones cuantitativas de Causa-Efecto(entradas-salidas), por medio de ecuaciones lineales o no lineales empíricas o desarrollando criterios o hipótesis experimentales. Los modelos determinísticos generalmente se utilizan al tener una información limitada lo cual es común la ingeniería hidráulica, en estos casos se debe rehacer indirectamente la evolución de escurrimientos y flujos superficiales a partir de información de precipitación. Los modelos determinísticos se subdividen en conceptuales y empíricos. (Organización Meteorológica Mundial, 1994)

**Modelos conceptuales:** Los modelos conceptuales se los han creado en respuesta a dificultades que presentan los modelos ya que estos presentan problemas en la modelización de cuencas que necesitan transformaciones complejas de lluvia a caudal. Es por esto que los modelos conceptuales son propuestas de modelización que integran ecuaciones de la estructura que se basan en conceptos de los procesos físicos de escurrimiento.

Los problemas que presentan los modelos están relacionados con la calibración del modelo seleccionado para una determinada cuenca. Dado que los parámetros se determinan por medio de procesos de iteración en el cual se utilizan datos históricos de entrada y salida, en algunos casos se convierte en un modelo imperfecto, ya sea por la información histórica limitada y/o la cantidad, confiabilidad y exactitud de los parámetros (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

Estos modelos conceptuales están compuestos por:

- ✓ Modelo del Centro Hidrometeorológico de la ex URSS (guía práctica)
- ✓ Modelo Sacramento
- ✓ Modelo tanque

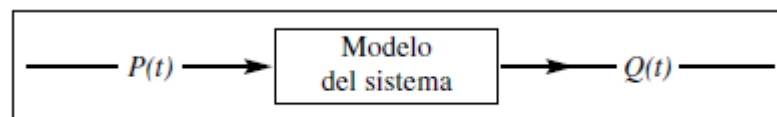
**Modelos hidrodinámicos:** Los modelos hidrodinámicos se basan en una discretización espacial de una cuenca y la integración de ecuaciones de momentos y conservación de la masa, los mismo que describen los procesos físicos de la cuenca. Estos modelos permiten el uso completo de información relativa a los procesos físicos en la cuenca, además estos modelos están también basados en las leyes físicas que rigen los procesos los modelos conceptuales representan mayor confiabilidad en la extrapolación de datos (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

#### **Modelos empíricos.**

También conocidos como teóricos, representan el componente determinante de un modelo. Dado que se sustenta en relaciones estadísticas relevantes entre las variables, los cuales están basados en técnicas y métodos estadísticos que relacionan entrada y salida que concuerdan con el interés de los procesos físicos del sistema, estos métodos se clasifican en modelos de regresión y correlación, modelos probabilísticos y modelos estocásticos. El primer modelo relaciona funciones mediante un tratamiento estadístico de datos experimentales y posteriormente se transforman en términos de coeficientes de correlación, límites de confianza y comprobación. En los métodos probabilísticos en cambio se utiliza la noción de frecuencia para determinar el comportamiento de un fenómeno hidrológico y se considera un error probable ya que la información que se obtiene en un análisis hidrológico es limitada. Por último, en los modelos estocásticos consideran datos históricos a manera de secuencia hidrológica (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

**Modelos de caja negra:** Una cuenca se considera como un sistema dinámico en el cual sus parámetros invariables agrupados se transforman en factores de entrada, en un tramo de río el caudal del afluente aguas arriba debe tomarse como un factor adicional de entrada (Figura 4).

Teóricamente los sistemas dinámicos, hidrológicos, se comportan de manera lineal, si satisfacen el principio de superposición; en otras palabras, la reacción del sistema a una combinación de entradas es igual a la suma de sus respuestas a las entradas separadas y que los parámetros del sistema son independientes de la respuesta del sistema (Organización Meteorológica Mundial-N, 1994).



*Figura. 4 Modelo matemático de caja negra.*

*Fuente: (Organización Meteorológica Mundial, 1994)*

### **1.3.1.2 Evaluación de parámetros**

Los métodos que existen para la evaluación e identificación de parámetros se los llama métodos de calibración de modelo, estos se han desarrollado y han significado mucho éxito en su aplicación. Existen dos métodos básicos de calibración de los cuales el primero es el modelo matemático que en combinación con los datos y la resolución de ecuaciones permiten obtener los parámetros del sistema, la desconfianza de este método se da ya que en este método se generan ecuaciones con mucha complejidad de resolución y pueden tener múltiples soluciones. El segundo método es la experimentación de varias combinaciones de valores de parámetros para encontrar una optimización de estos valores, los cuales dependerán en gran parte del criterio (Organization, 2012).

### ***1.3.1.3 Hidrología estocástica***

La ciencia estocástica se define como el arte de estimar la probabilidad de eventos de manera que, de acuerdo con nuestro criterio y proceder, se escoja el camino más seguro y con el riesgo mínimo, así mismo en la estadística el termino estocástico es igual a aleatorio, pero se lo utiliza para referirse a series de tiempo aleatorias. La hidrología estocástica se la puede utilizar siempre y cuando se diseñe o en la toma de decisiones operacionales. El diseñador o analista no está en posición de las conocer la precipitación o caudales futuros, pero si puede suponer las mismas propiedades estocásticas de registro histórico para los eventos futuros. Este criterio de suposición es la base para la hidrología estocástica ya que la generación de las secuencias o eventos equiprobables en los que cada secuencia tiene propiedades estadísticas similares (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

Una serie de tiempo hidrológica típica es una descripción cuantitativa histórica de precipitación y caudales en un punto determinado. La información obtenida es limitada en una serie de tiempo, pero este registro se representa en términos de mecanismos o como relaciones matemáticas las mismas que tienen diferentes grados de precisión. Si se requiere se puede generar series de tiempo por medio de funciones matemáticas que se difieren de las series de tiempo observadas, pero estas conservan muchas propiedades de la serie original. La generación de secuencias se las realiza de manera que cada uno de los eventos individuales tengan la misma probabilidad de ocurrencia que la secuencia observada (Linsley, Kohler, & Paulhus, 1988).

### ***1.3.1.4 Simulación estocástica de series hidrológicas de tiempo.***

Estos modelos se consideran como modelos de caja negra y sus parámetros se calcula a partir de propiedades estadísticas de series de tiempo observadas. En la hidrología se introdujeron los métodos estocásticos junto con el diseño de embalses de almacenamiento.

Los volúmenes de flujo en una serie de tiempo anual, mensual, diaria, etc., facilitan la información necesaria para un estudio, es por esto que el embalse debe tener una capacidad que refleje una probabilidad de ocurrencia en cuanto a las secuencias críticas de flujo que se pueden evaluar de una mejor manera a partir de un conjunto de secuencias de escorrentía, los periodos deben abarcar muchos años para representar los registros históricos ya que estos registros contienen propiedades estadísticas que ayudan a la selección de un modelo estocástico apropiado (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

### ***Modelo Markoviano de primer orden.***

En el análisis estocástico se supone un proceso estacionario, lo que quiere decir que se conservan las propiedades estadísticas en el tiempo, lo cual las propiedades estadísticas de registro histórico se pueden utilizar para obtener una secuencia sintética larga que permite utilizarla de manera efectiva para la planificación. Las secuencias sintéticas deberán ser similares a la secuencia histórica en sus características estadísticas (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

Una Serie de tiempo básicamente se modelaría matemáticamente como la combinación de dos componentes que son una parte determinística y otra parte residual aleatoria y se utiliza el análisis de las series de tiempo para determinar las formas particulares de dichos componentes (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

En los esquemas de generación de los volúmenes de agua basta para suponer una estructura Markoviano de primer orden, es decir que un evento cualquiera depende únicamente de un evento que lo precede. La función más sencilla que se utiliza para una generación Markoviano de volúmenes de flujo anual(Q) está representada por:

$$Q_i = \bar{Q} + \rho(Q_{i-1} - \bar{Q}) + t_i \sigma \sqrt{1 - \rho^2} \quad (1.20)$$

***Determinístico aleatorio.***

Donde:

$t$ = Variable aleatoria tomada de distribución, con una media igual a cero y una varianza unitaria.

$\sigma$ = Desviación estándar de Q

$\rho$ = Coeficiente de correlación serial con rezago unitario

$\bar{Q}$ = media de Q

$i$ =Identifica caudales desde el año 1 hasta n.

$Q_{i-1}$ = si  $\sigma$ ,  $\rho$  y Q se determina de manera de registro histórico y se supone un valor de  $Q_{i-1}$  como inicial se puede construir un algoritmo.

Si se busca generar valores mensuales estacionales de Q, se debe incluir en el proceso las características de las variaciones estacionales:

$$Q_{i*j} = \bar{Q}_{j+\rho_j} \frac{\sigma_j}{\sigma_{j-1}} (Q_{i-1,j-1} - \bar{Q}_{j-1}) + t_i \sigma_j \sqrt{1 - \rho_j^2} \quad (1.21)$$

Donde:

$j$ = Subíndice que define estaciones o meses (varia en 1 y 12)

$i$ = Designación serial desde mes 1 hasta el mes n.

$\rho_j$ = Es el coeficiente de correlación entre  $Q_j$  y  $Q_{j-1}$ .

## **Distribución de “t”**

Si la variable  $t$  es la variable aleatoria que se toma de una distribución, la ecuación anteriormente mencionada no podrá representar la distribución histórica, aunque se mantenga la varianza y la media. En el caso que la distribución histórica sea normal el valor  $t$

### **1.3.2 Principios del programa de simulación HEC-HMS.**

El centro de Ingeniería Hidrológica, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU, diseñó el programa de computación Sistema de Modelamiento Hidrológico (HEC-HMS). Este programa provee una variedad de opciones para simular procesos de precipitación - escurrimiento y también tránsito de caudales entre otros (Gaspari, Rodríguez, Senisterra, Delgado, & Basteiro, 2013).

Para representar la respuesta de una cuenca ante un fenómeno hidrológico se emplea el programa computacional HEC-HMS el cual utiliza las siguientes componentes: modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada, una simulación se puede decir que es una transformación de la precipitación a caudal empleando modelos meteorológicos y componentes de la cuenca (Nania, 2007).

#### ***1.3.2.1 Componentes de modelos de cuenca.***

Esta componente representa la cuenca física, el usuario realiza la modelación de la cuenca conectando elementos hidrológicos, estos elementos emplean modelos matemáticos para describir el proceso físico que se genera en la cuenca como se observa en la tabla 13.

*Tabla 13: Características de los elementos hidrológicos.*

<b>Elemento Hidrológico</b>	<b>Descripción</b>
Subcuenca (Subbasin)	Se usa para representar la cuenca física. Dada la precipitación, la salida de agua de la subcuenca se calcula restando las pérdidas de a la precipitación y transformando el exceso de precipitación en caudal en el punto de salida de la subcuenca, sumando finalmente el caudal base.
Tramo (Reach)	Se usa para transportar el agua generada en algún punto de la cuenca hacia aguas abajo hasta otro punto de la cuenca, definidos ambos en el modelo de la cuenca. La respuesta de este transporte es un retardo y una tención del hidrograma de entrada.
Unión (Juncion)	Se usa para sumar flujos de agua que provienen de elementos hidrológicos situados aguas arriba de la unión. La respuesta es simplemente la suma de los hidrogramas de todos los elementos conectados a la unión.
Fuente (Source)	Se usa para introducir agua dentro del modelo de la cuenca. Este elemento no tiene entrada y la salida está definida por el usuario.
Sumidero (Sink)	Se usa para representar el punto de salida de la cuenca. La entrada puede provenir de uno o más elementos situados aguas arriba del sumidero. Este elemento no tiene salida.
Deposito (Reservoir)	Se usa para modelar la retención y atenuación de un hidrograma causado por un embalse o depósito de retención. La entrada puede provenir de uno o varios elementos hidrológicos situados aguas arriba del depósito. La salida puede calcularse de 2 maneras: el usuario define una relación almacenamiento-salida, cota-almacenamiento-salida o cota-área-salida o bien el usuario define una relación cota-almacenamiento o cota-área y una o más estructuras de salida
Derivación (Diversion)	Se usa para modelar un flujo de agua que abandona un tramo de cauce. La cuenca de entrada proviene de uno o varios elementos de aguas arriba. La salida de este elemento consiste un flujo derivado y otro no derivado (que sigue por el cauce). El flujo derivado se define por el usuario. Tanto los flujos derivados como no-derivado se pueden conectar aguas abajo con otros elementos.

*Fuente: (Nania, 2007).*

A continuación, en la tabla 14 se presentan los métodos empleados para el cálculo del tipo de modelo para la representación de la subcuenca:

**Tabla 14: Métodos para el cálculo de subcuencas.**

<b>Tipo de modelo</b>	<b>Método</b>
Perdidas	Déficit y tasa constante (DC) Inicial y tasa constante Exponencial Numero de curva CN SCS Green y Ampt Consideración de la humedad del suelo (SMA) DC por celdas SMA por celdas
Transformación lluvia-caudal	Hidrograma unitario (HU) de Clark Onda cinemática ModClark HU SCS U Snyder HU especificado por el usuario Hidrograma en S del usuari
Flujo Base	Recesión restringida Constante mensual Depósito lineal Recesión

*Fuente: (Nania, 2007).*

### **1.3.2.2 Componentes del modelo meteorológicos.**

Los modelos meteorológicos calculan la entrada de la precipitación que necesita cada elemento de la subcuenca, también se incluye la evapotranspiración el cual se lo puede realizar por cualquier método puede ser de la constante mensual y el de Priestley Taylor, los métodos de evapotranspiración se los aplica cuando se desea una respuesta de la cuenca continua o largo plazo (Nania, 2007). A continuación, en la tabla 15 se describe algunos métodos empleados en el modelo meteorológico.

*Tabla 15: Métodos empleados en el modelo meteorológico.*

<b>Métodos de Precipitación</b>	<b>Descripción</b>
Tormenta asociada a frecuencia	Se usa para desarrollar un evento de precipitación donde los volúmenes correspondientes distintas duraciones tienen una probabilidad de excedencia constante.
Pluviómetros con pesos	Este método aplica pesos definidos por el usuario a los pluviómetros que el usuario desee
Pluviómetros por celdas	Este método permite usar productos con precipitación por celdas, como por ejemplo los datos de Radar.
Inversa de la distancia	Se usa para calcular la precipitación media en una subcuenca aplicando una ponderación basada en la inversa de la distancia al cuadrado.
Tormenta de SCS	Este método aplica una distribución temporal tipo SCS a un volumen total de lluvia en 24 horas.
Hietograma especificado	Este método aplica un hietograma definido por el usuario a un elemento de subcuenca.
Tormenta de proyector estándar	El método aplica una distribución temporal a un volumen índice de precipitación (este índice se extrae de un Manual del Corps of Engineers y el válido sólo para Estados Unidos. Está actualmente en desuso).

**Fuente:** (Nania, 2007).

### ***1.3.2.3 Componentes de las especificaciones de control.***

Este punto hace referencia al tiempo de duración de la simulación, incluyendo también fecha, hora de comienzo y fin del proyecto e intervalo de cálculo.

### **Componentes de la entrada de datos.**

Datos de series de tiempo, pares de datos y datos por celda son requeridos como parámetros o condiciones de contorno en los modelos de la cuenca y meteorológicos. Seguidamente en la tabla 16 se presenta una lista de datos de entrada del HEC-HMS:

*Tabla 16: Parámetros de entrada del HEC-HMS.*

<b>Series temporales de datos</b>	<b>Pares de datos</b>	<b>Datos por celdas</b>
Pluviómetros Medidores de caudal Limnómetro Termómetros Medidores de radiación solar Medidores de coeficientes de cultivo	Funciones almacenamiento-caudal Funciones cota-almacenamiento Funciones cota-área Funciones cota-caudal Funciones caudal-derivación Secciones transversales Hidrogramas unitarios	Precipitación Temperatura Radiación solar Coeficiente de cultivo Capacidad de almacenamiento Tasa de percolación Coeficiente de almacenamiento Déficit de húmeda Área impermeable
<b>Series temporales de datos</b>	<b>Pares de datos</b>	<b>Datos por celdas</b>
	Curvas de porcentaje Funciones de fusión de nieve Patrones de tasa de fusión de nieve	Numero de curva CN SCS Cotas Equivalente de agua de nieve Contenido de agua Tasa de fusión de nieve

*Fuente: (Nania, 2007)*

### **1.3.3 Principios del programa de simulación HEC-ResSim.**

El HEC-Reservoir System Simulation (HEC-ResSim) es un programa empleado para la simulación de embalses que fue desarrollado por el centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de Ingeniero de los estados unidos, el cual ayuda para la operación de reservorios, para el manejo de inundaciones, aumento de bajo flujo y suministro de agua para estudios de planificación, investigaciones detalladas del plan de regulación de reservorios y soporte de decisiones en tiempo real. (HEC-ResSim) puede representar reservorios de gran y pequeña escala y sistemas de reservorios a través de una red de elementos (uniones, tramos de enrutamiento, desvío, reservorios) que el usuario construye (Klipsch & Hurst, 2013).

El software HEC-ResSim es el más aplicado entre los modelos de simulación para la gestión de embalses, ya que ayuda a la toma de decisiones para el mejor funcionamiento de los reservorios. El programa representa el comportamiento físico del embalse a través de una serie de combinación de cálculo hidráulicos para flujos, análisis hidrológico para simbolizar el desface y la atenuación de los flujos a través del cauce del río.

### **1.3.3.1 Análisis de simulación.**

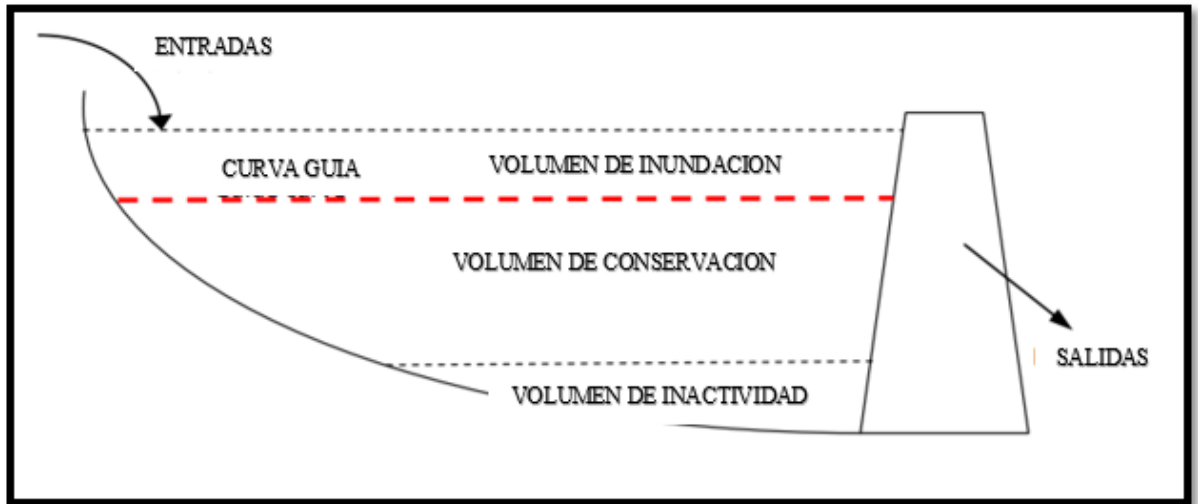
Los programas de simulación utilizan flujo de entrada (hidrología), operación (reglas de decisión) y balance de masas dentro de la cuenca (conectividad) para observar el comportamiento hidrológico de un sistema de embalses. El rendimiento de la simulación depende de la selección de indicadores de flujo y/o almacenamiento y característica que el modelador considere importante. Algunos indicadores que se pueden mencionar son: los niveles de almacenamiento del embalse, flujos de entrada a las corrientes, generación hidroeléctrica, riego, abastecimiento de agua (WONDYE, 2009).

Para desarrollar una simulación el modelador procede realizando el rendimiento empleando indicadores seleccionados para un caso base, donde indica el comportamiento hidrológico del sistema, a continuación, el modelador despliega una serie de comportamientos alternativos del sistema combinando las diferentes características del embalse, con la finalidad de que el modelador compare los resultados base con los objetivos planteados (WONDYE, 2009).

### **1.3.3.2 Reglas de operación.**

Dentro de cualquier embalse los requerimientos y limitaciones del flujo dependen netamente del nivel de agua del embalse. Por tanto, las reglas de operación varían debido a la cantidad de agua almacenada, el HEC-ResSim describe esta variación dividiendo al embalse en zonas y aplicando diferentes normas a cada zona. El HEC-ResSim crea tres zonas predeterminadas dentro de un embalse: control de inundaciones (flood control), conservación (conservation), inactiva (inactive), una zona de operación se define por una curva de elevación de agua que puede ser constante o cambiar debido a su variación estacional, cuando el nivel de agua en el embalse excede la parte superior de una zona las reglas no se pueden aplicar para la toma de decisiones (Klipsch & Hurst, 2013).

En el HEC-ResSim cada embalse debe de contar con una elevación de destino o conocida también como curva guía y está representada como una función del tiempo. La curva guía es aquella línea que divide la zona superior (zona control de inundaciones) y la zona inferior (zona de conservación) como se observa en la ilustración 8 (WONDY, 2009).



*Ilustración 8. Curva guía y zonas propuesta según HEC-ResSim.*

*Fuente: (WONDY, 2009).*

La curva guía tiene como finalidad de supervisar las liberaciones de agua manteniendo el nivel de almacenamiento, la operación de liberación por lo general es para sacar agua lo más rápido posible cuando la entra se inunde y elevar el almacenamiento por encima de la curva guía, también reducir la liberación al mínimo necesario para satisfacer la conservación requerida cuando los flujos de entrada son bajos provocando que el nivel de almacenamiento se reduzca por debajo de la curva guía (WONDY, 2009).

### **1.3.3.3 Funcionamiento del modelo HEC-ResSim.**

El HEC-ResSim incluye el escenario de caso base que se empleará para la calibración y validación de software, el programa brinda tres conjuntos diferentes de funciones que se lo denomina módulos que suministran acceso a tipos de específicos de datos de la cuenca. Lo

módulos son: Watershed module (módulo de la Cuenca), Reservoir module (modulo del depósito), Simulation module (módulo de simulación), cada uno de estos módulos tiene un único propósito y un conjunto de funciones accesibles por medio de menús, barra de herramientas y esquema elementales, en la figura 5 se observa algunas características básicas de los módulos (WONDYE, 2009).

#### **Módulo de configuración de la cuenca (Módulo Watershed Setup).**

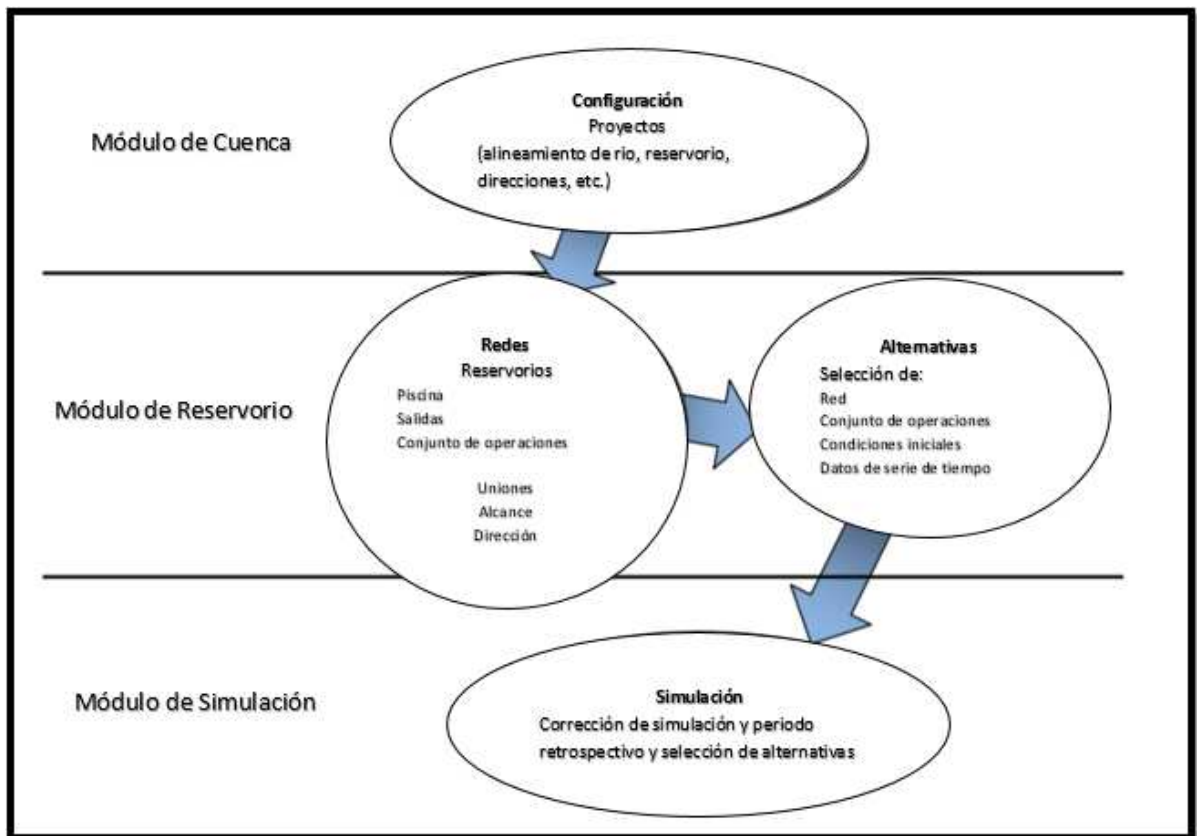
En este módulo se realiza el ensamblaje de elementos físicos que describen la cuenca, cuando se crea una nueva cuenca existe la posibilidad de importar mapas de otras fuentes externas luego de especificar las unidades de mediciones y grupo de coordenadas el cual se puede ver el mapa, también puede importar mapas de alineamiento de corriente empleando la barra de herramientas del menú watershed (WONDYE, 2009).

#### **Módulo de la red de depósito (Reservoir network module).**

En este módulo es la zona donde todas las reservas disponibles y las divisiones son añadidas uniéndose entre sí por medio de los enrutamientos de elementos de alcance, usando las configuraciones realizadas en el módulo de configuración de la cuenca para cada alternativa o escenario de forma independiente. Después de la creación de los esquemas de red, se describe los datos físicos y operacionales del sistema de depósito, es por ello que se emplea la relación área-volumen-elevación la cual debe ser actualizada para examinar la disminución del rendimiento (WONDYE, 2009).

#### **Módulo de la simulación (Simulation module).**

Una vez generado el modelo del depósito y realizado las alternativas como se observa en la Figura 5, se empleará el módulo de simulación para observar los resultados donde se tendrá una selección del intervalo de cálculo (WONDYE, 2009).



*Figura. 5. Características de los módulos de HEC-ResSim.*

*Fuente: (WONDYE, 2009).*

#### **1.3.3.4 Calibración y validación del modelo.**

Para realizar el proceso de calibración y validación se lo realiza determinando los parámetros más sensibles para un determinado estudio, el usuario observa que variable se va ajustar basándose en la sensibilidad del análisis. El análisis de sensibilidad es el proceso de establecer la tasa de diferencia de la producción del modelo con relación a los cambios en las entradas del modelo, es por ello necesario identificar las claves y la precisión para la calibración, normalmente se puede realizar dos tipos de análisis de sensibilidad el local el que se lo realiza cambia uno a uno los valores de los parámetros y el global que se lo desarrolla cambiando todos los valores de los parámetros (Arnold, Moriasi, Gassman, Abbaspour, & White, 2012).

Existen diferentes métodos para analizar la confiabilidad de las propiedades de diferencia o relación entre los resultados de los modelos implementados y se los describe a continuación:

### **Error medio (ME)**

La siguiente formula determina la diferencia media entre el caudal observado y el simulado (Valles León, 2017).

$$ME = \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})}{n} \quad (1.22)$$

En donde:

$Q_{sim}$ : Caudal simulado

$Q_{obs}$ : Caudal observado

$n$ : número de caudales

### **Error Medio Absoluto (MAE).**

Es el valor medio aritmético de los errores absolutos de cada medida. Este valor será siempre positivo y representa mayor exactitud si su valor se aproxime a 0.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (1.23)$$

Donde:

$O_i$ : datos observados

$P_i$ : datos calculados

$n$ : número de datos

### **Error Medio Relativo Cuadrado (*RMSE*).**

En este método se compara el ajuste entre los datos observados y los extraídos del modelo. Los valores de *RMSE* que se aproximan a 0 son óptimos ya que los errores no existirían o son mínimos y la relación sería perfecta, pueden darse cualquier valor positivo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} * \frac{1}{\sigma} \quad (1.24)$$

Donde:

$O_i$ : datos observados

$P_i$ : datos calculados

$n$ : número de datos

$\sigma$ : media aritmética de los datos observados

### **Valor normalizado del RMSE (NRMSE)**

Fundamentado en la desviación estándar del caudal observado en el año 2004 Singh et al, proporciono pautas para cuantificar un valor bajo de RMSE (Valles León, 2017).

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\sigma_{obs}} \quad (1.25)$$

En donde:

RMSE: Raíz de error cuadrático medio

$\sigma_{obs}$ : Desviación estándar del caudal observado

### **Desviación Media (*BIAS*).**

El presente método proporciona información sobre la tendencia a sobreestimar o subestimar una variable y cuantifica un error del modelo, pero su valor óptimo es cero. En otras palabras, con este método se mide un error medio sistemático entre las predicciones y las observaciones.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n} \quad (1.26)$$

Donde:

$O_i$ : datos observados

$P_i$ : datos calculados

$n$ : número de datos

$\sigma$ : media aritmética de los datos observados

### **Coefficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE)**

Se encuentran valores entre  $-\infty$  a 1, siendo 1 un indicador de reproducción perfecta entre los caudales; asimismo la bibliografía señala que si se obtiene valores mayores a 0.6 ofrece una ejecución del modelo con resultados favorables, por tanto, si se obtiene un coeficiente de eficiencia de 0 o menor es preferible usar como predictor el caudal observado promedio al modelo (Valles León, 2017).

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs})^2} \quad (1.27)$$

En donde:

$Q_{sim}$ : Caudal simulado

$Q_{obs}$ : Caudal observado

### **Coefficiente de correlación lineal o de Pearson (R)**

Determina la correlación lineal entre los caudales simulados y observados. Si se obtiene un valor igual a 1 indica un valor perfecto (Carmona Rojas, 2019).

$$r = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1.28)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^N (q_{m,i} - \bar{q}_m)^2} \quad (1.29)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2} \quad (1.30)$$

En donde:

$\sigma_x$ : Desviación típica de los caudales simulados

$\sigma_y$  : Desviación típica de los caudales observados

### **Coefficiente de determinación (R<sup>2</sup>)**

A partir de la proporción entre la variación del caudal simulado y el observado esta ecuación facilita el análisis de la bondad de la predicción. Si se obtiene un valor de 0 implica un ineficaz potencial de predicción. A diferencia de un valor 1 que supone que no existe ningún error (Valles León, 2017).

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (1.31)$$

SSE: Suma cuadrática del error

SST: Suma cuadrática de la regresión

### **Coefficiente de Eficiencia (EF2).**

Mediante este método se analiza una relación 1:1 de los datos en análisis (Nash & Sutcliffe , 1970). Los valores fluctúan menores a 1, en donde si se llegase a obtener valores de 1 se tomaría como un ajuste perfecto y un valor que se considera como adecuado es 0.7

$$EF_2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \sigma)^2} \quad (1.32)$$

Donde:

$O_i$ : datos observados

$P_i$ : datos calculados

$n$ : número de datos

$\sigma$ : media aritmética de los datos observados

### **Coefficiente de determinación (CD).**

Este coeficiente permite medir la proporción variabilidad total de una variable dependiente con su media que se explica con el de regresión. En este coeficiente se obtendrá siempre valores positivos y como en el anterior método mencionado el valor optimo es  $CD = 1$ .

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \sigma)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \sigma)^2} \quad (1.33)$$

Donde:

$O_i$ : datos observados

$P_i$ : datos calculados

$n$ : número de datos

$\sigma$ : media aritmética de los datos observados

### **Coefficiente de eficiencia de Kling-Gupta (KGE)**

Dicho coeficiente vincula el coeficiente de correlación de Pearson, la relación entre los caudales simulados y observados promedios y la relación de la varianza. Si el coeficiente presenta un valor de 1 señala que se dispone de una representación satisfactoria de los caudales (Valles León, 2017).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (1.34)$$

Donde:

$r$ : Coeficiente de correlación de Pearson

$\alpha$  : Relación entre la varianza

$\beta$  : Relación de los caudales simulados y observados

A continuación, en la tabla 17 se observan los límites de cada método mencionado anteriormente.

*Tabla 17: Límites de valores de calibración y validación.*

<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>
Error medio absoluto	MAE	0	$+\infty$
Error medio relativo cuadrado	RMSE	0	$+\infty$
Coefficiente de eficiencia	EF2	$-\infty$	1
Coefficiente de determinación	CD	0	$+\infty$
Desviación media	BIAS	$-\infty$	$+\infty$
Error medio	ME	0	$+\infty$
Valor normalizado del RMSE	NRMSE	0	$+\infty$
Coefficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe	NSE	$-\infty$	1
Coefficiente de correlación lineal o de Pearson	r	-1	1
Coefficiente de determinación	$R^2$	0	1
Coefficiente de eficiencia de Kling-Gupta	KGE	$-\infty$	$+\infty$

*Fuente: (Nania, 2007).*

## Capítulo 2: Análisis Hidrológico de las subcuencas del del Rio Paute

En presente capítulo se realizará un análisis hidrológico donde se obtendrá los diferentes parámetros geomorfológicos y parámetros hidrológicos de cada subcuenca involucrada en la zona de estudio, los cuales se emplean para la aplicación del modelo HEC-HMS que permite la obtención del escurrimiento superficial.

### 2.1 Aplicación de un sistema de información geográfica para el análisis geomorfológico de la cuenca.

Para llevar a cabo un análisis espacial es indispensable el uso de los sistemas de información geográfica, en el presente trabajo se consideró 13 cuencas hidrográficas cuyo aporte se extiende a lo largo del rio paute hasta la central Mazar, dichas subcuencas se originaron en función de los principales ríos de la zona.

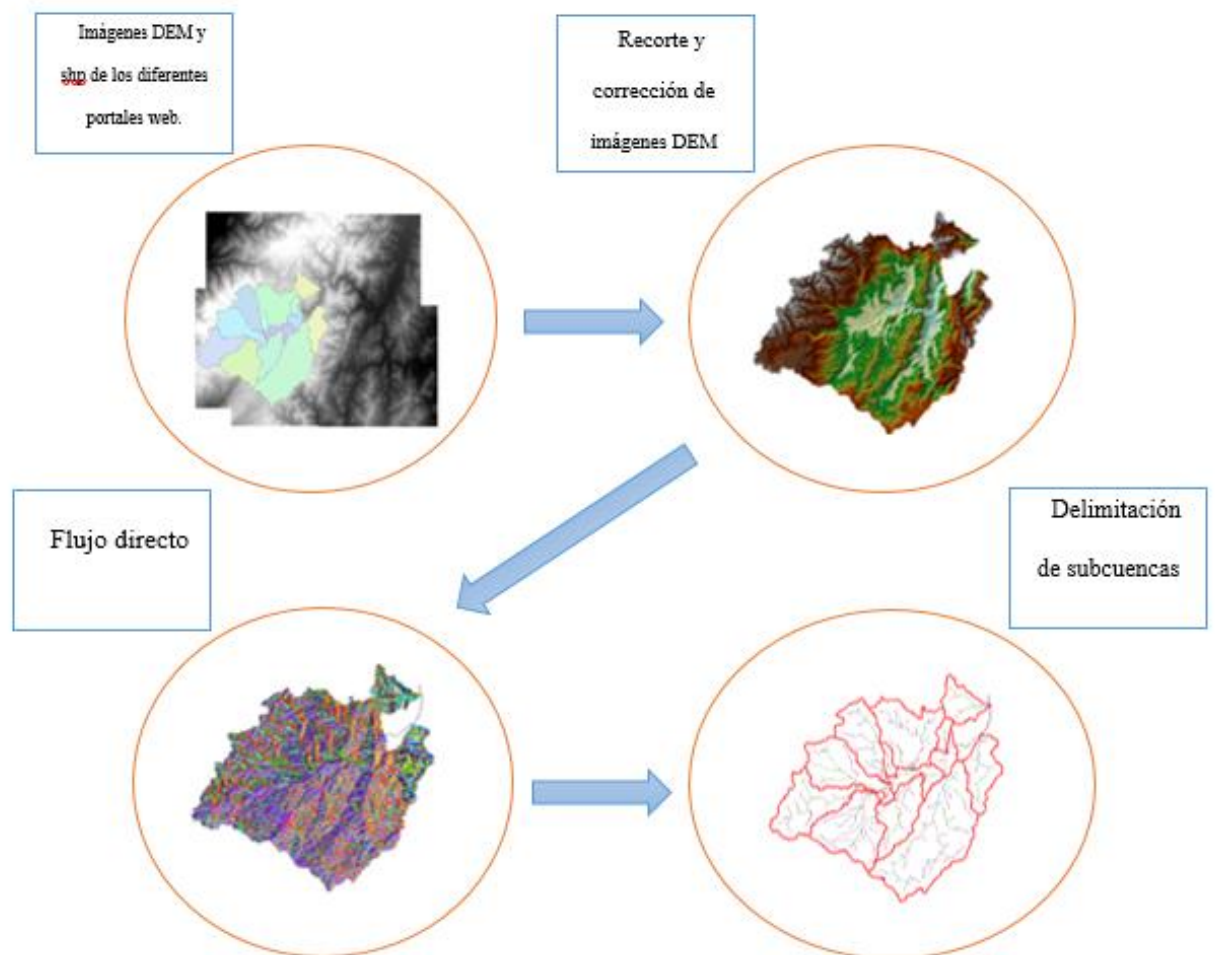
La delimitación de las subcuencas y sus diferentes parámetros geomorfológicos se realizó en el software ArcGIS 10.3 y su extensión HEC-GeoHMS, el cual permite efectuar un análisis espacial de la información y delimitación de cuencas hidrográficas empleando sus diferentes herramientas. La información cartográficas e imágenes DEM fueron obtenidas de los diferentes portales que se expresan en la tabla 18:

*Tabla 18: Informaciones obtenidas de los diferentes sitios web.*

<b>SIGTIERRAS Formato shape</b>	<b>ALOS PALSAR DEM Formato DEM</b>	<b>Instituto Geográfico Militar – formato shape</b>
Provincias	Mapas de elevación satelital DEM 12.5m	Cobertura de suelo
Ríos		
Curvas de nivel		
Subcuencas		Uso de suelo
Geo pedología		

*Fuente: Elaboración propia.*

Todo DEM es procesado con el fin de eliminar valores erróneos, de igual manera se realiza un relleno de los espacios que se encuentren sin datos, dicho espacios se generan dependiendo de la cobertura que abarcan los modelos a ser estudiados, la superficie de cobertura de estos modelos es 88%, como se describe en la Figura 6.



**Figura. 6** Delimitación de una cuenca hidrográfica.

*Fuente: Elaboración propia*

Las subcuencas delimitadas forman la cuenca de aporte del embalse Mazar, la cual está ubicada entre Azuay, Cañar y Morona Santiago, como resultado de esta delimitación se determinó 13 subcuencas: Burgay, Cuenca, Jadán, Machángara, Magdalena, Paute, Santa

Bárbara, Sidcay, Tarqui, Tomebamba, Yanuncay, Collay, Pindilig, las cuales aportan directamente al río Paute y fluyen hasta embalsar en Mazar.

### 2.1.1 Parámetros geomorfológicos

En la ilustración 9 se aprecia la delimitación de la subcuenca de análisis, de la cual se han obtenido ciertos parámetros geomorfológicos determinados en función de la información adquirida de diferentes entidades, a partir de dicha información se ha establecido un listado de los parámetros geomorfológicos de mayor relevancia, tomando en cuenta que algunos de estos se pueden generar de manera directa en el software ArcGIS y son base para calcular el resto de parámetros.

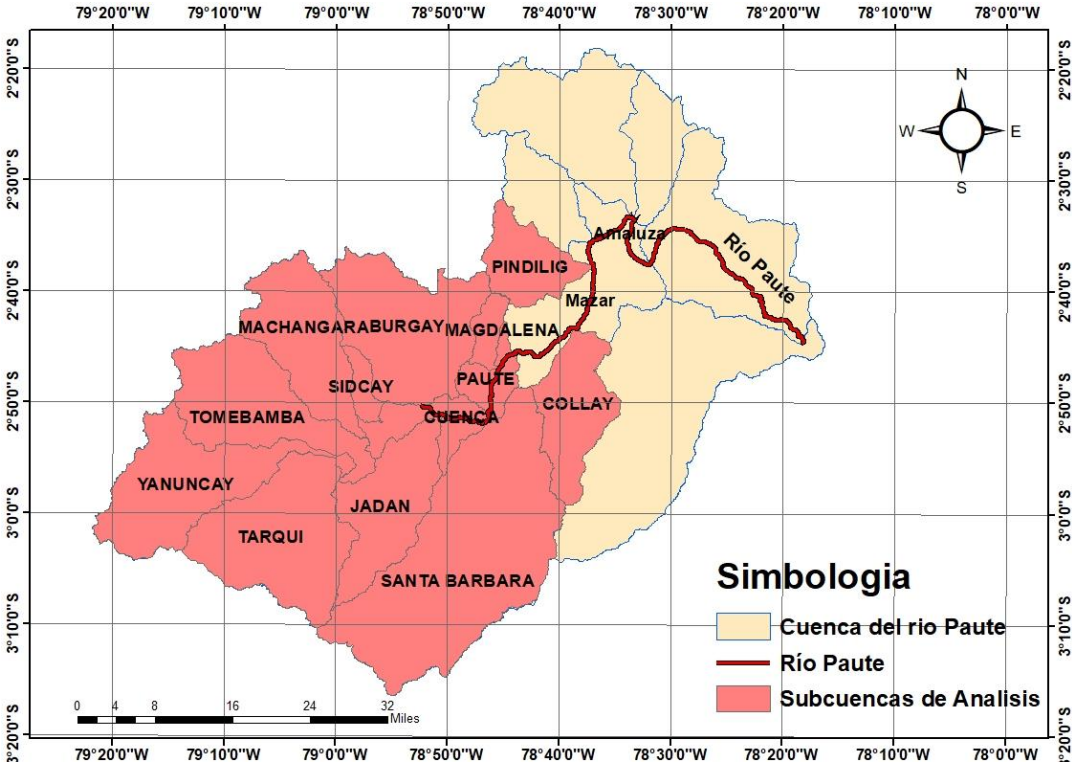


Ilustración 9. Subcuencas de análisis.

Fuente: Elaboración propia

### 2.1.1.1 Área de las subcuencas

Una vez recopilada la información extraída de cada subcuenca, inicia el procesamiento de información en función de la superficie de la subcuenca delimitadas, donde se obtuvo el tamaño respectivo de cada subcuenca para ser reclasificada según (Gálvez, 2011) como se observa en la tabla 19.

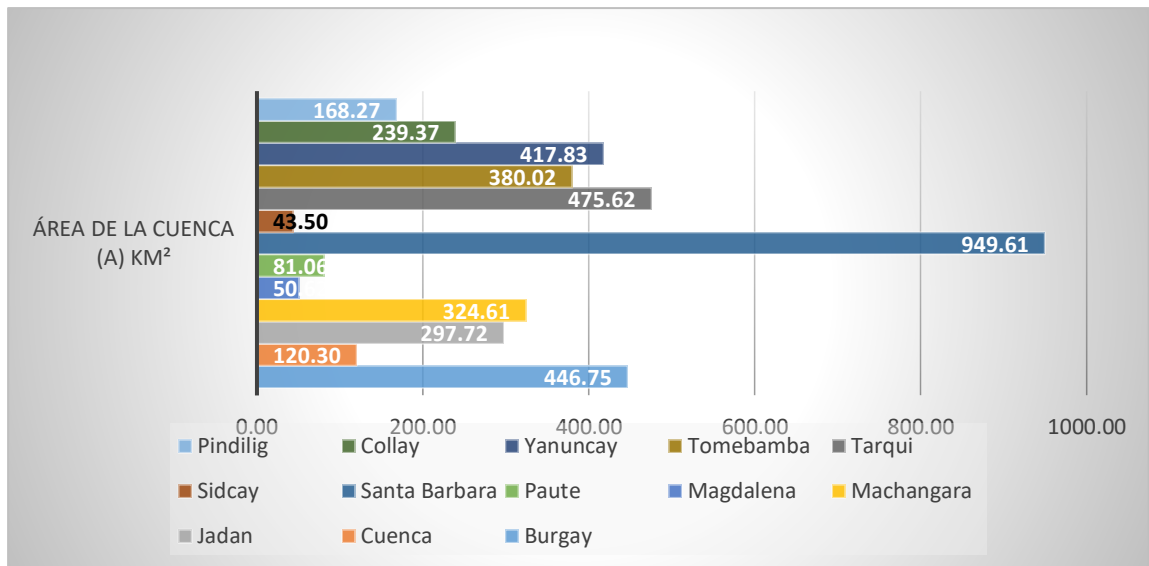
*Tabla 19: Tamaña de las subcuencas de análisis.*

<b>Subcuenca</b>	<b>Área de la cuenca (A) km<sup>2</sup></b>	<b>Tipo de cuenca</b>
<b>Burgay</b>	446.746	Intermedia-Pequeña
<b>Cuenca</b>	120.297	Pequeña
<b>Jadán</b>	297.718	Intermedia-Pequeña
<b>Machángara</b>	324.612	Intermedia-Pequeña
<b>Magdalena</b>	50.616	Pequeña
<b>Paute</b>	81.063	Pequeña
<b>Santa Barbara</b>	949.609	Intermedia-Grande
<b>Sidcay</b>	43.497	Pequeña
<b>Tarqui</b>	475.623	Intermedia-Pequeña
<b>Tomebamba</b>	380.024	Intermedia-Pequeña
<b>Yanuncay</b>	417.834	Intermedia-Pequeña
<b>Collay</b>	239.367	Pequeña
<b>Pindilig</b>	168.274	Pequeña

*Fuente: Elaboración propia*

De los valores obtenidos en la tabla 21 se puede inferir que el 54% de las subcuencas son pequeñas ya que no superan el valor de 250 km<sup>2</sup>, el otro 38% de subcuencas se denominan intermedia-pequeña puesto que no supera el límite de 500 km<sup>2</sup> mientras que el 8% son subcuencas intermedia-grande.

Por otro lado, los resultados obtenidos indican que la subcuenca más extensa con respecto a las otras es la denominada Santa Barbara, y la de menor área es Sidcay como se muestra en la figura 7.

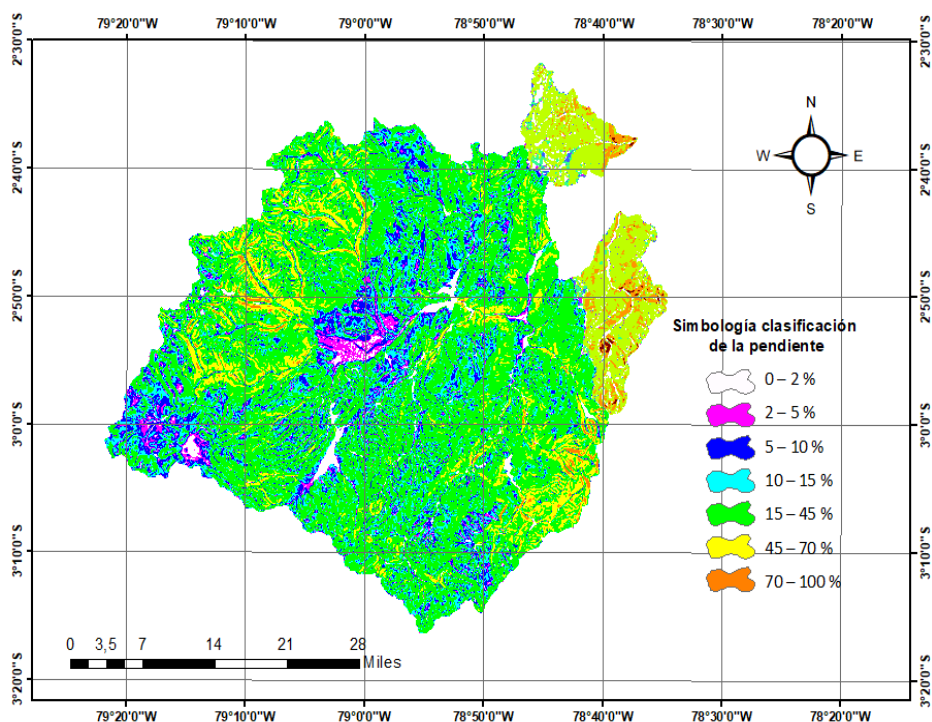


*Figura. 7 Área de cada subcuenca.*

*Fuente: Elaboración propia*

### 2.1.1.2 Pendiente media de la cuenca y pendiente media del cauce principal

Una vez determinado el área se generó un mapa de pendientes del cual se lo creo con una imagen DEM de las diferentes subcuencas como se puede observar en la ilustración 10.



*Ilustración 10. Mapa de pendientes de las subcuencas.*

*Fuente: Elaboración propia*

En la ilustración 10 se observa la reclasificación de los valores de la pendiente, en la cual se calculó la pendiente media de cada subcuenca y de la misma manera se determinó de la pendiente media del cauce, detallado en la tabla 20.

*Tabla 20: Pendiente media de las subcuencas.*

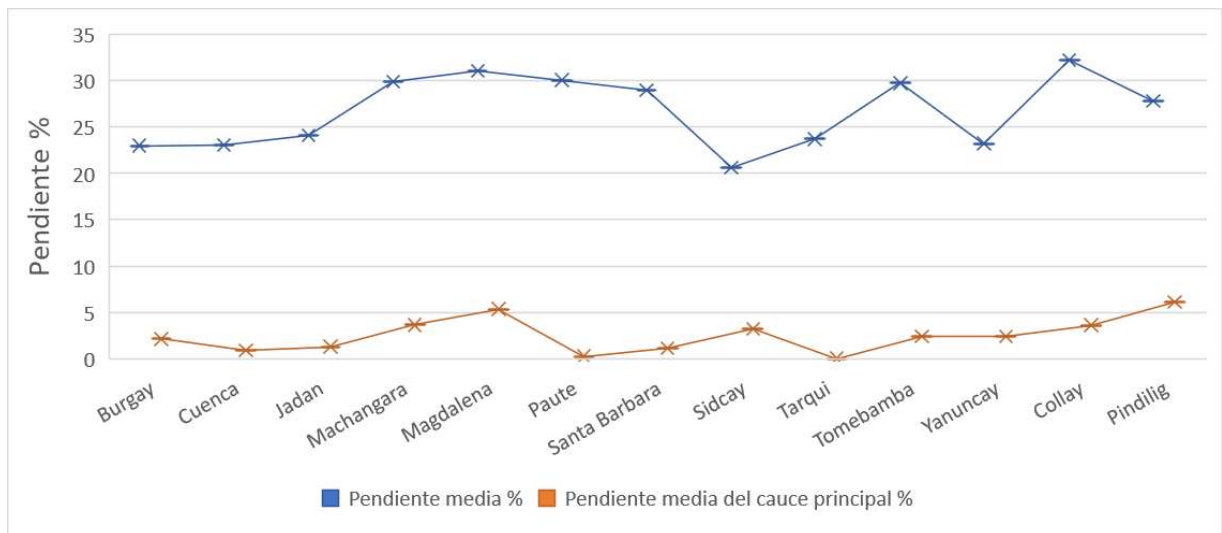
<b>Subcuenca</b>	<b>Pendiente media %</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pendiente media del cauce principal %</b>
Burgay	23	Fuertemente ondulado	2.2
Cuenca	23	Fuertemente ondulado	0.9
Jadán	24	Fuertemente ondulado	1.3
Machángara	30	Fuertemente ondulado	3.7
Magdalena	31	Fuertemente ondulado	5.4
Paute	30	Fuertemente ondulado	0.3

<b>Continuación tabla 20. Pendiente media de la subcuenca</b>			
<b>Subcuenca</b>	<b>Pendiente media %</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pendiente media del cauce principal %</b>
Santa Barbara	29	Fuertemente ondulado	1.2
Sidcay	21	Fuertemente ondulado	3.3
Tarqui	24	Fuertemente ondulado	0.1
Tomebamba	30	Fuertemente ondulado	2.4
Yanuncay	23	Fuertemente ondulado	2.4
Collay	32	Fuertemente ondulado	3.6
Pindilig	28	Fuertemente ondulado	6.1

*Fuente: Elaboración propia.*

A partir de la tabla 20 y la ilustración 10 es posible deducir que gran parte de la cuenca posee pendientes superiores al 15%, es decir el terreno es el ondulado y fuertemente ondulado, lo que representa una variación entre los fenómenos de precipitación, temperatura y presiones, además el valor de las pendientes influye directamente en el drenaje de las subcuencas y disminuye el proceso de la infiltración, al igual que lo tiempos de concentración.

Además, en la figura 8 se puede apreciar las pendientes medias de la cuenca y el cauce principal, en donde la primera no supera el 25% y la segunda el 6.1%, no obstante, en ninguna se presentan cambios abruptos de pendiente

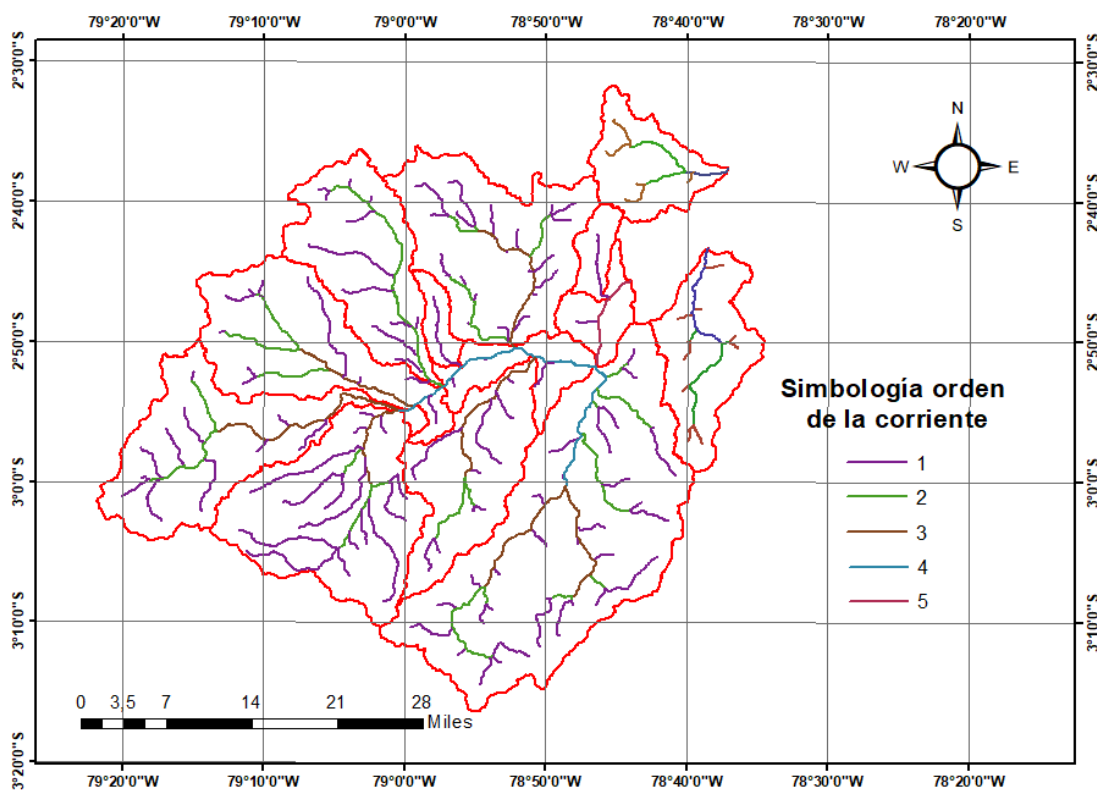


**Figura. 8 Pendiente media de la cuenca y cauce principal.**

*Fuente: Elaboración propia*

### 2.1.1.3 Red de drenaje

Como se puede apreciar en la ilustración 11 se obtiene un mapa de la jerarquía de las corrientes a través del método de Strahler, donde color morado representa el primer orden y color rojo representa un quinto orden el cual depende de cómo se vayan agrupando los cauces aguas abajo y en la misma ilustración se puede representar el patrón de drenaje.



*Ilustración 11. Mapa orden de corrientes.*

*Fuente: Elaboración propia*

Además, en la tabla 21 se presentan las características de la red de drenaje clasificada según su longitud total, orden de la corriente y patrón de drenaje de cada subcuenca.

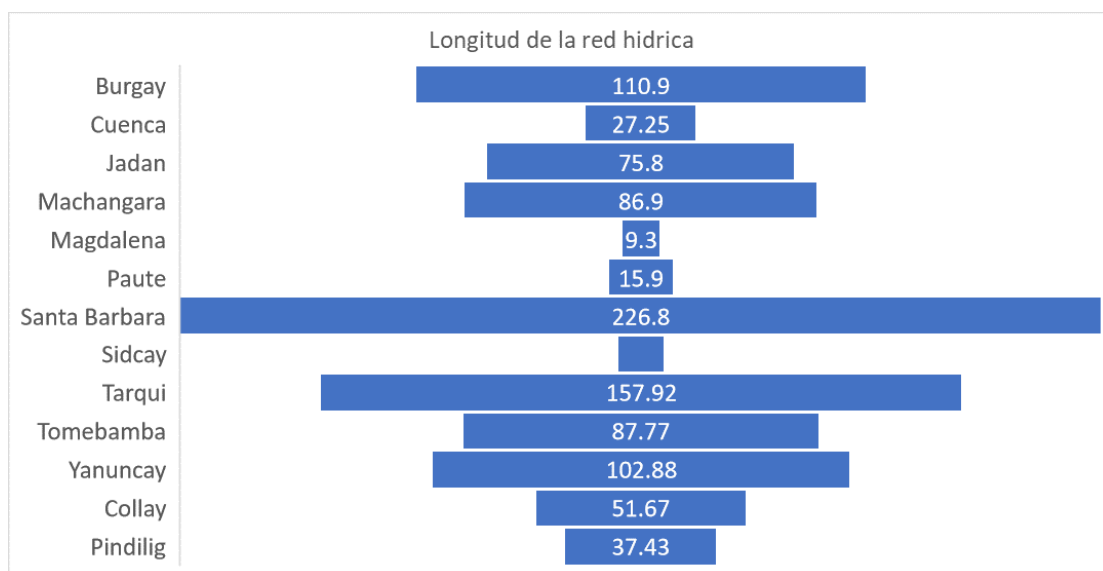
*Tabla 21: Características de la red de drenaje.*

Subcuenca	Longitud red hídrica (km)	Orden de la corriente	Patrón de drenaje
Burgay	10.9	3	Dendrítico
Cuenca	27.250	4	Rectangular
Jadán	75.8	3	Dendrítico
Machángara	86.9	2	Dendrítico
Magdalena	9.3	1	Rectangular
Paute	15.900	5	Rectangular
Santa Barbara	226.8	4	Angular
Sidcay	11.46	1	Rectangular
Tarqui	157.92	3	Dendrítico
Tomebamba	87.77	3	Dendrítico
Yanuncay	102.88	3	Angular

<b>(Continuación) Tabla 21. Características de la red de drenaje</b>			
<b>Subcuenca</b>	<b>Longitud red hídrica (km)</b>	<b>Orden de la corriente</b>	<b>Patrón de drenaje</b>
Collay	51.67	4	Dendrítico
Pindilig	37.43	4	Dendrítico

Fuente: Elaboración propia

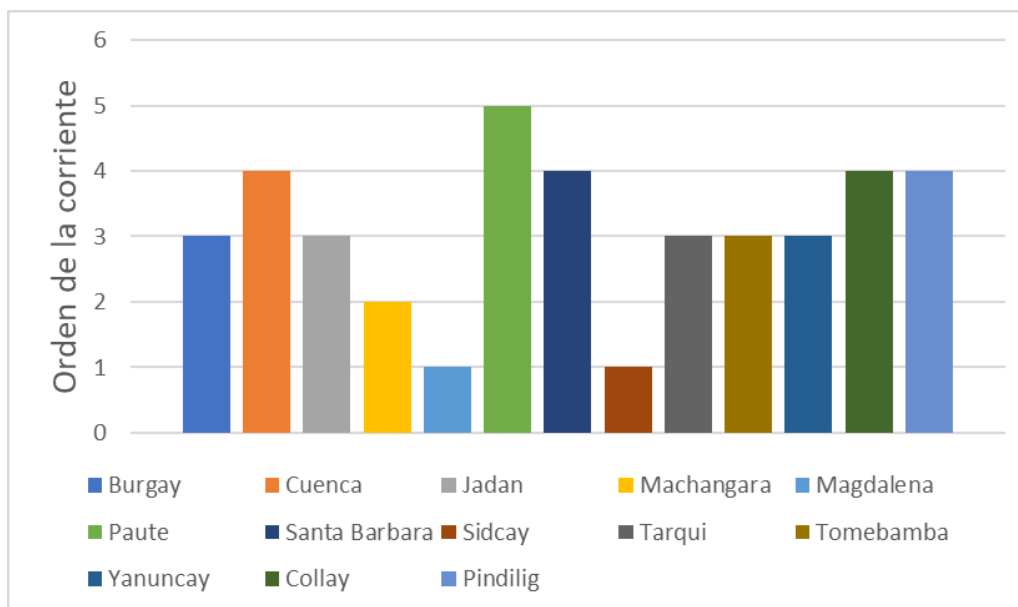
En la tabla 23 y figura 9 se presentan la longitud de la red hídrica de cada subcuenca, siendo la más extensa la de la subcuenca Santa Bárbara.



*Figura. 9 Longitud de la red hídrica de cada subcuenca.*

Fuente: *Elaboración Propia*

Como se observa en la tabla 23 y la figura 10, el orden del cauce es determinado de cada subcuenca de análisis tienen un orden 5 o menor, el orden general o el grado de ramificación dentro de la cuenca se conceptualizó de orden 5, por consiguiente, las subcuencas por su bajo orden de cauce principal poseen bajas condiciones de infiltración y sus capacidades de retención se reducen (Guallpa, Quito, & Adrián Culcay, 2015).



**Figura. 10 Orden de la corriente de cada subcuenca.**

*Fuente: Elaboración propia*

Además, en la figura 10 se determinó el patrón de drenaje de cada subcuenca, donde se obtuvo que el 54% de las subcuencas son dendríticas lo que quiere decir que sus flujos son tipo arbustivo, el otro 31% de subcuenca son de tipo rectangular esto hace referencia que sus afluentes menores discurren casi en ángulos rectos y el 15% restante de subcuencas son de carácter angular esto sucede debido a las rocas que cambian de dirección del drenaje de la subcuenca.

#### **2.1.1.4 Factores de relieve y forma de la cuenca**

Los parámetros que describen mejor la forma de la cuenca y su conducta frente a las condiciones climáticas es el factor de forma. En la tabla 23 se describen los valores de factores de forma de cada subcuenca.

**Tabla 22: Factor de forma.**

<b>Subcuenca</b>	<b>Factor de forma de Horton (kf)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Índice de capacidad (kc)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Relación de elongación (R)</b>	<b>Descripción</b>
Burgay	0.52324	Ligeramente ensanchada	1.569188	Óvalo oblonga - rectangular oblonga	0.815942218	Relieve suave
Cuenca	0.28681	Alargada	2.191688	Rectangular - Muy lobuladas	0.604095819	Relieve fuerte
Jadán	0.21853	Muy alargada	1.688497	Óvalo oblonga - rectangular oblonga	0.527312345	Relieve fuerte
Machángara	0.29826	Alargada	1.581291	Óvalo oblonga - rectangular oblonga	0.616040077	Relieve fuerte
Magdalena	0.31933	Ligeramente alargada	1.492397	Óvalo redonda - óvalo oblonga	0.63742487	Relieve fuerte
Paute	0.57728	Ligeramente ensanchada	1.801998	Rectangular - Muy lobuladas	0.857041814	Relieve suave
Santa Barbara	0.40824	Ni alargada ni ensanchada	1.549053	Óvalo oblonga - rectangular oblonga	0.720716136	Relieve fuerte
Sidcay	0.21693	Muy alargada	1.624442	Óvalo oblonga - rectangular oblonga	0.525379638	Relieve fuerte
Tarqui	0.64193	Ensanchada	1.424250	Óvalo redonda - óvalo oblonga	0.903758902	Relieve suave
Tomebamba	0.30706	Ligeramente alargada	1.779769	Rectangular - Muy lobuladas	0.62505591	Relieve fuerte
Yanuncay	0.21840	Muy alargada	2.027352	Rectangular - Muy lobuladas	0.527147623	Relieve fuerte
Collay	0.27725	Alargada	1.563180	Óvalo oblonga - rectangular oblonga	0.593943458	Relieve fuerte
Pindilig	0.49024	Ligeramente ensanchada	1.485428	Óvalo redonda - óvalo oblonga	0.789791594	Relieve fuerte

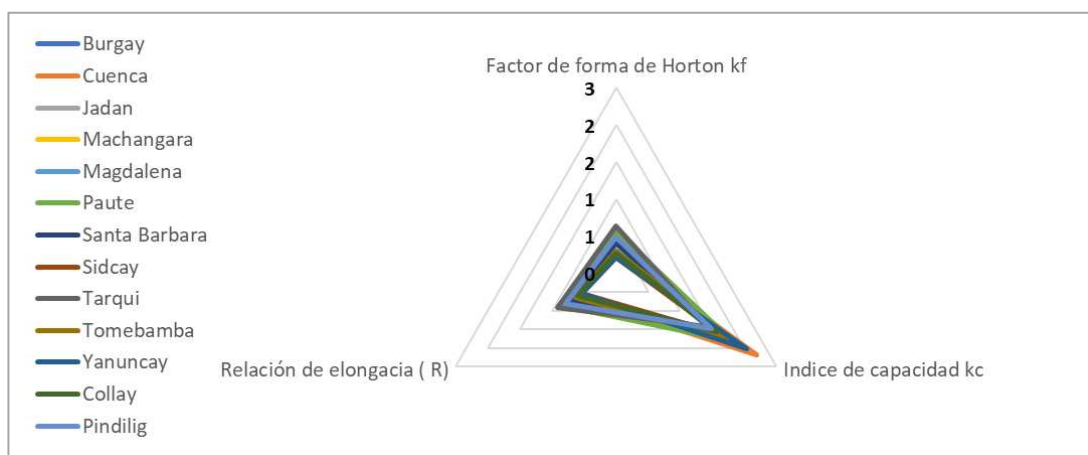
**Fuente: Elaboración propia**

Una vez obtenido el factor de forma de Horton en la tabla 24 se puede determinar que el 61% de la subcuenca tiene una forma alargada, el 31% de subcuencas son ligeramente ensanchadas y el 8% restante de subcuencas no son ensanchada o ni alargadas, debido que la forma de cuenca afecta en la formación de los hidrogramas de escorrentía y las tasas de flujo máximo.

Además en la tabla 24 se determinó el índice de capacidad o coeficiente de Gravelius que es otro indicador de la forma de la cuenca, donde el 46% de la subcuencas son óvalo oblonga - rectangular oblonga, el 31% de la subcuencas son rectangular - muy lobuladas y 23% de subcuencas restantes es ovalo oblonga - rectangular oblonga, en estos valores obtenidos se observa que la mayoría son mayores a 1 esto indica que las subcuencas no tendrá fuertes concentraciones de volumen de agua (Cardona, 2014).

Otro de los factores que determina la forma es la relación de elongación como se aprecia en la tabla 24 se tiene que el 100% de todas las subcuencas tienen un relieve fuerte.

No obstante, en la figura 11 se puede observar que los factores de forma calculados de cada subcuenca poseen valores similares.



**Figura. 11 Comparación radial de los factores de forma.**

**Fuente: Elaboración Propia**

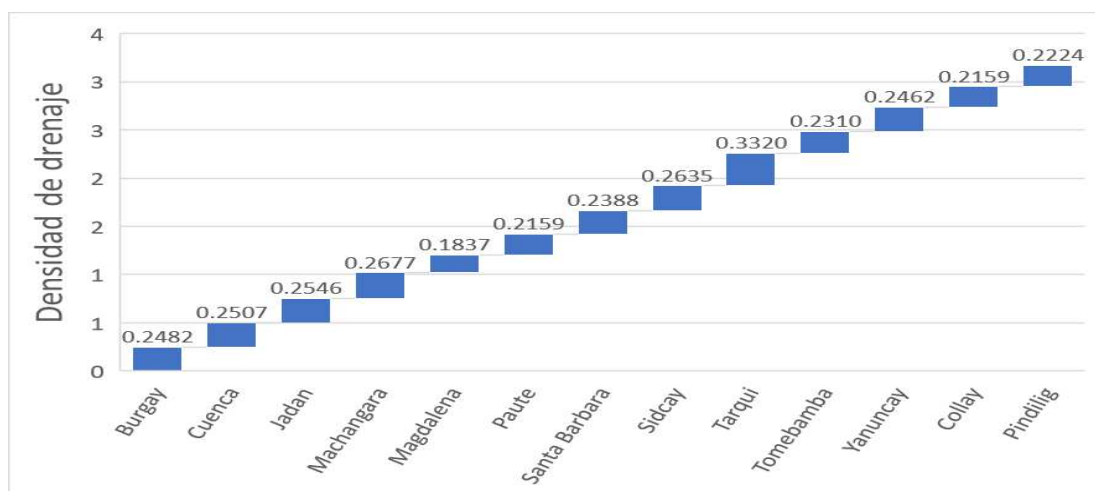
Otro de los parámetros geomorfológicos más relevantes de la subcuenca de análisis es la densidad de drenaje, ya que representan la mayor y menor concentración de escurrimiento respecto al cauce principal e influye en la concentración y en las crecidas (Guallpa, Quito, & Adrián Culcay, 2015). En la tabla 23 se presenta la densidad de drenaje de cada subcuenca.

**Tabla 23: Densidad de drenaje.**

<b>Subcuenca</b>	<b>Densidad de drenaje</b>	<b>Descripción</b>
Burgay	0.2482	Drenaje pobre
Cuenca	0.2507	Drenaje pobre
Jadán	0.2546	Drenaje pobre
Machángara	0.2677	Drenaje pobre
Magdalena	0.1837	Drenaje pobre
Paute	0.2159	Drenaje pobre
Santa Barbara	0.2388	Drenaje pobre
Sidcay	0.2635	Drenaje pobre
Tarqui	0.3320	Drenaje pobre
Tomebamba	0.2310	Drenaje pobre
Yanuncay	0.2462	Drenaje pobre
Collay	0.2159	Drenaje pobre
Pindilig	0.2224	Drenaje pobre

*Fuente: Elaboración propia*

En la tabla 24 se denota que el 100% de las subcuencas tiene un drenaje pobre, es decir la subcuenca tiene un bajo estado erosivo de manera que estos valores se consideran bajos generando un bajo escurrimiento. De igual manera, en la figura 12 se puede observar que el valor de la densidad de drenaje encuentra en un rango entre 0.33 a 0.18, lo que significa que la respuesta hidrológica de la cuenca lenta.

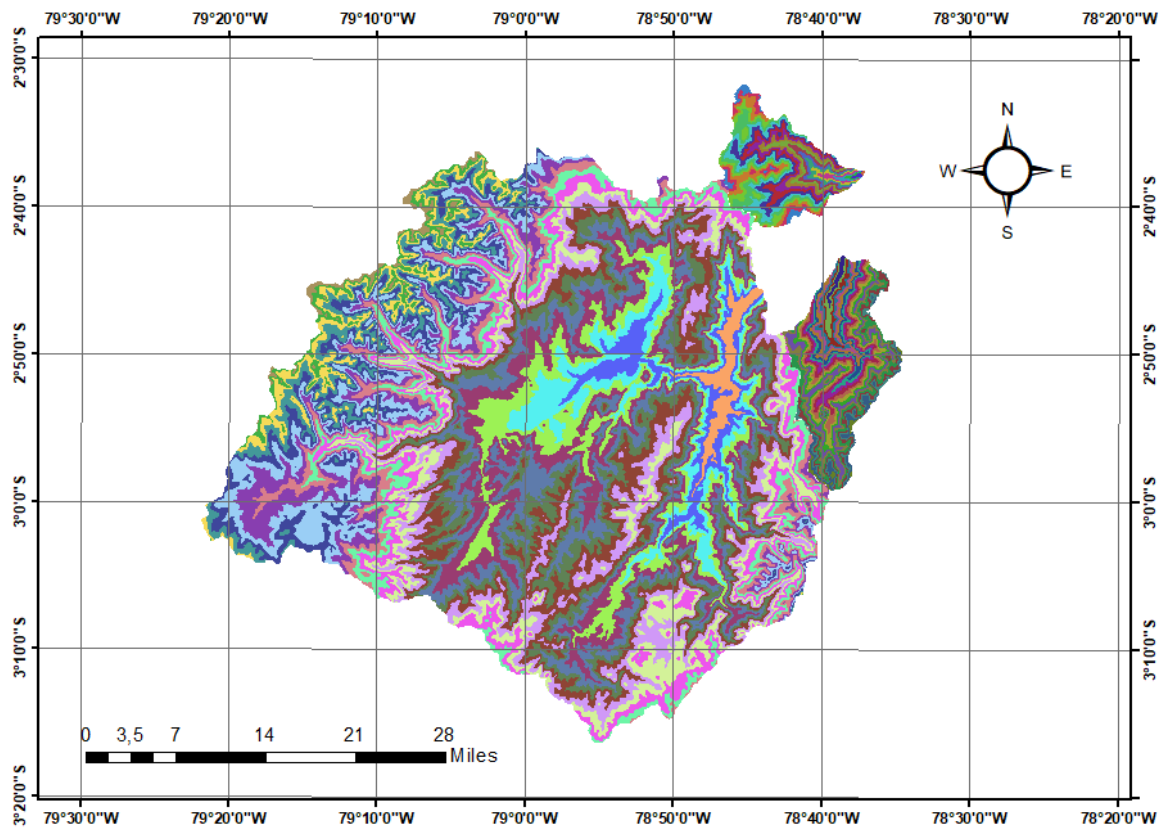


**Figura. 12 Densidad de drenaje**

*Fuente: Elaboración propia*

### 2.1.1.5 Curva hipsométrica

Curvas Hipsométricas como se detalla en el apartado de teórico una curva hipsométrica se pueden describir como una distribución de área acumulada de una cuenca con respecto a una altitud, en este apartado sea determinado las curvas hipsométricas para cada subcuenca perteneciente a la cuenca de análisis. Basados en la ilustración 12 se ah reclasificado cada curva hipsométrica según cada subcuenca y se presenta a continuación.



*Ilustración 12. Mapa de curvas hipsométricas de las subcuencas de análisis.*

*Fuente: Elaboración propia*

Como se puede observar en la ilustración 12 se generó un mapa de curvas hipsométricas de las subcuencas de aporte, estas se realizaron en intervalos de 110 metros donde se formaron 20 curvas como se observa en la ilustración 13, el análisis se realizó de esta manera donde

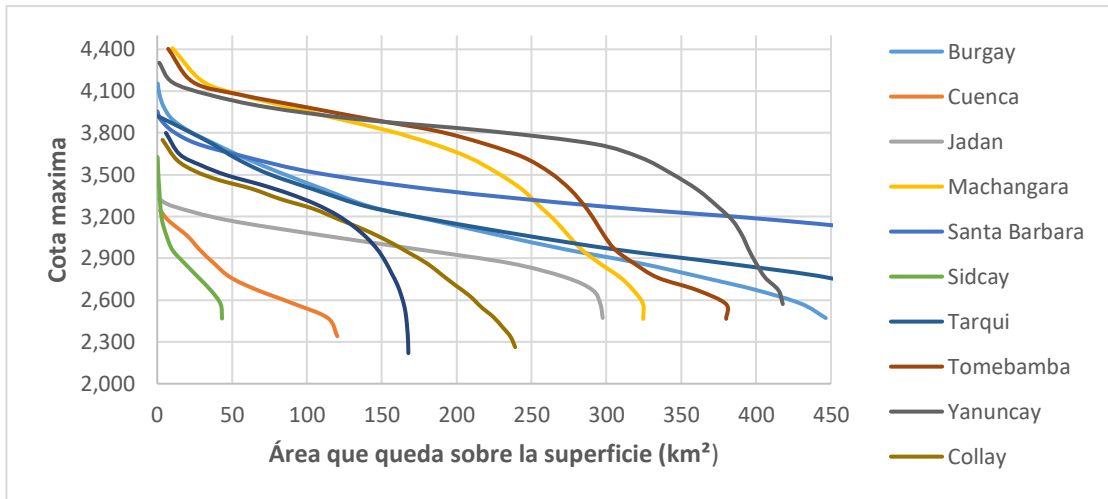
obtendra valor de entrada y salida del embalse, es por eso que la salida se le concidera la subcuenca de Pindilig y Collay.

Simbología curva hipsometricas								
CH Subcuenca			CH Collay			CH pindilig		
Simbolo	Cota min	Cota max	Simbolo	Cota min	Cota max	Simbolo	Cota min	Cota max
	2200	2337.5		2150	2262.49		2100	2219.52
	2337.5	2466.41		2262.49	2337.49		2219.52	2312.49
	2466.41	2569.53		2337.49	2406.24		2312.49	2392.17
	2569.53	2664.06		2406.24	2481.24		2392.17	2471.86
	2664.06	2758.59		2481.24	2550		2471.86	2551.55
	2758.59	2871.72		2550	2631.24		2551.55	2631.24
	2871.72	2956.25		2631.24	2706.25		2631.24	2710.93
	2956.25	3059.38		2706.25	2781.24		2710.93	2790.62
	3059.38	3162.5		2781.24	2862.49		2790.62	2876.95
	3162.5	3265.63		2862.49	2943.74		2876.95	2963.27
	3265.63	3385.94		2943.74	3025		2963.27	3049.6
	3385.94	3506.25		3025	3106.25		3049.6	3129.28
	3506.25	3617.97		3106.25	3181.25		3129.28	3208.98
	3617.97	3712.5		3181.25	3256.25		3208.98	3288.66
	3712.5	3807.03		3256.25	3325		3288.66	3361.71
	3807.03	3892.97		3325	3400		3361.71	3428.12
	3892.97	3978.91		3400	3462.49		3428.12	3494.52
	3978.91	4064.84		3462.49	3525		3494.52	3567.57
	4064.84	4159.38		3525	3603.25		3567.57	3647.25
	4159.38	4400		3603.25	3750		3647.25	3799.99

*Ilustración 13. Rangos de la curva hipsométrica*

*Fuente: Elaboración propia*

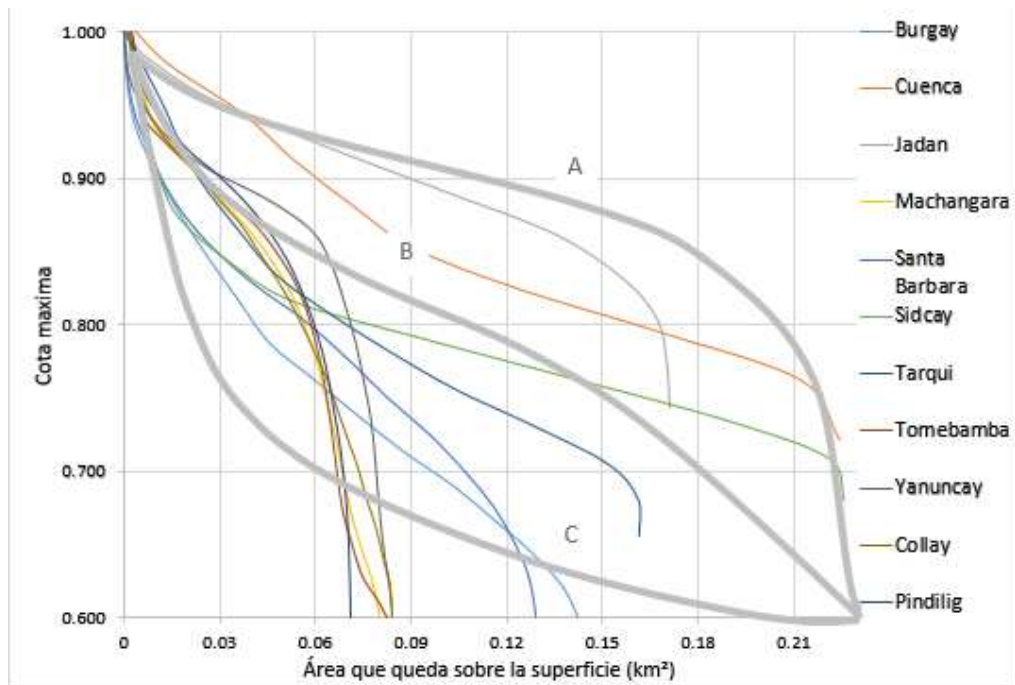
Una vez realizado el procesamiento de informacion generada en la ilustracion 13 se realizo la construccion de las curvas hipsometricas de las diferentes subcuencas como se observa en la Figura 13.



**Figura. 13. Curvas hipsométricas de subcuencas.**

*Fuente: Elaboración propia*

A continuación, se realizó una comparación entre las curvas hipsométricas determinadas versus las curvas estándar como se observa en la Figura 14 se obtuvo como resultado la clasificación de cada curva hipsométrica calculada.



**Figura. 14. Comparación de curvas hipsométricas de subcuencas VS. Curvas hipsométricas estándar.**

*Fuente: Elaboración propia*

La tabla 24 se observa la clasificación de las curvas hipsométricas obtenida se la figura 14.

**Tabla 24: Clasificación de curvas hipsométrica.**

<b>Subcuenca</b>	<b>Tipo de Curva</b>
Burgay	B
Cuenca	B
Jadán	B
Machángara	B
Magdalena	B
Paute	B
Santa Barbara	B
Sidcay	C
Tarqui	B
Tomebamba	A
Yanuncay	A
Pindilig	A
Collay	B

*Fuente: Elaboración propia*

En la tabla 24 se observa que el 69% de la subcuencas se encuentran en una fase de maduras, es decir es un subcuenca equilibrada, el 23% de la subcuencas se encuentran en una fase de juventud, lo que quiere decir que son altamente erosivas y el 8% de las subcuencas restantes se encuentran en una fase de vejez, es decir es una cuenca sedimentaria.

#### **2.1.1.6 Numero de curva de Cuenca de análisis.**

El Numero de curva de las subcuencas que conforman la cuenca del Rio Paute dependen del uso y tipo de suelo determinado por el método SCS (Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos), el cual es un modelo empírico desarrollado para definir un umbral de escorrentía (P0) en función de un número hidrológico o número de curva (CN) agregado de la cuenca. Los valores que toma el número de curva CN se encuentran entre los intervalos de 0 y

100, dependiendo de la capacidad que presentan en generar escorrentía superficial, además, estos valores representan condiciones de impermeabilidad y permeabilidad, es decir, aquellos valores que tiendan a 0 son indicativos de alta permeabilidad y los que se aproximen a 100 señalan impermeabilidad.

El valor de Grupo hidrológico (GH) es uno de los parámetros necesarios para definir el número de curva, el cual se obtiene a partir de la tabla 25 y se lo clasifica según la textura del suelo. El programa ArcGIS y su extensión GeoHMS relaciona las condiciones de GH DE USO y USO DE SUELO, para lo cual se realiza una reclasificación de los componentes, clasificando el uso de suelo en Agua, Residencial, Bosques y Agricultura

**Tabla 25: Reclasificación.**

<b>Clasificación original</b>	<b>Reclasificación</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Número</b>	<b>Descripción</b>
Agua a cielo abierto	1	Agua
Humedales leñosos		
Humedales herbáceos emergentes		
Poblados en espacios abiertos	2	Residencial media
Poblados de baja intensidad		
Poblados de mediana densidad		
Poblados de alta densidad		
Bosques secos	3	Bosque
Bosques verdes		
Bosques mixtos		
Tierra fértil	4	Agricultura
Arbustos / matorrales		
Pastizales / herbáceas		
Pasto / heno		
Cultivos		

*Fuente: (Vera & Lopez Jara , 2020).*

Una vez ejecutada la reclasificación de la información para cada subcuenca de análisis se requiere una correlación entre los datos para determinar el número de curva de cada una, esto se realizó en el software GeoHMS (Tabla 26).

Tabla 26. Relación entre Uso de suelo y Grupo Hidrológico.

Rowid	OBJECTO	CAMPO	LUVALOR	DESCRIPCION	A	B	C	D
1	1	1	1	AGUA	100	100	100	100
2	2	2	2	RESIDENCIA	57	72	81	86
3	3	3	3	BOQUES	30	58	71	78
4	4	4	4	AGRICULTURA	67	77	83	87

Fuente: ArcGIS.

En la ilustración 13 se presenta el resultado del mapeo del número de curva de cada subcuena.

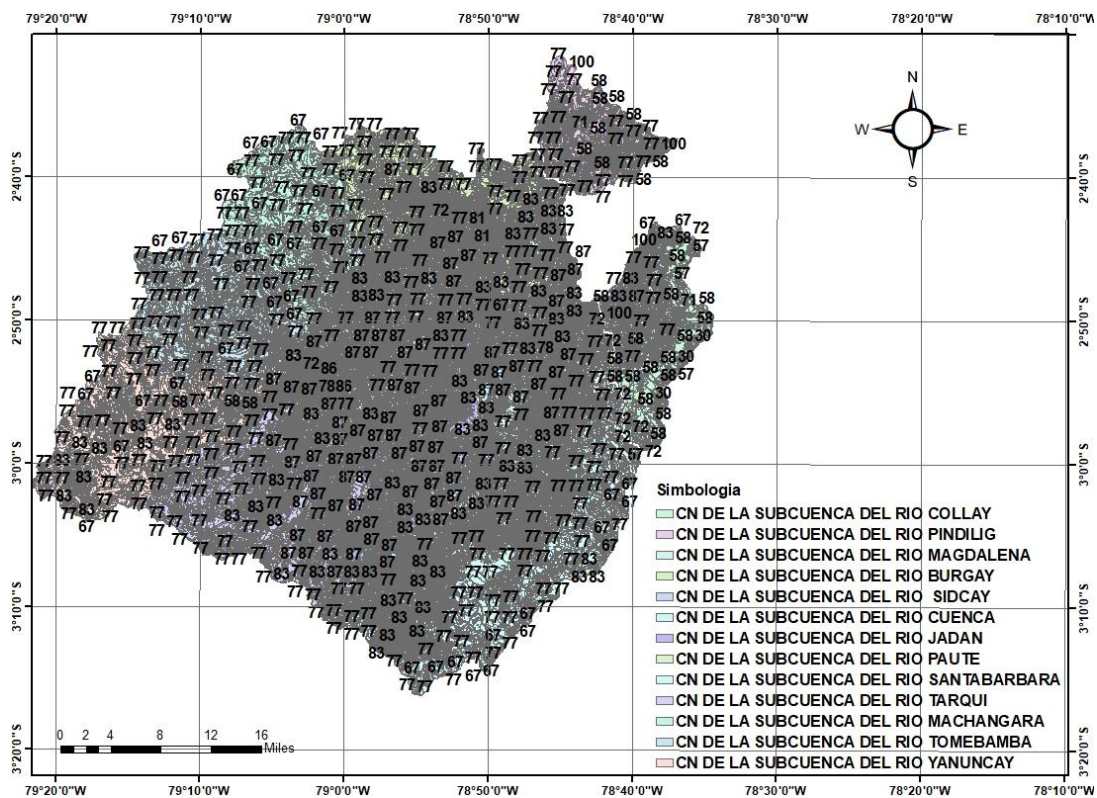


Ilustración 14. Mapa del Numero de curva (CN).

Fuente: Elaboración propia

Considerando que el número de curva de la ilustración 14 abarca áreas estrechas y limitadas, en las que cada una comprende solamente un uso y tipo de suelo específico, por lo que para estimar el número de curva de cada subcuenca se aplicó la siguiente ecuación:

$$N_{comp} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i N_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.1)$$

En donde:

$N_{comp}$ : Número de curva promedio ponderado de una subcuenca

$A_i$ : Área de cada polígono perteneciente a la subcuenca

$N_i$ : Número de curva de cada polígono perteneciente a la subcuenca

El número de curva promedio ponderado de cada subcuenca para aplicar en el modelo se describe en la tabla 29.

*Tabla 27: Número de curva promedio.*

<b>Subcuenca</b>	<b>CN promedio</b>
<b>Burgay</b>	75
<b>Cuenca</b>	84
<b>Jadán</b>	84
<b>Machángara</b>	73
<b>Magdalena</b>	79
<b>Paute</b>	79
<b>Santa Barbara</b>	77
<b>Sidcay</b>	82
<b>Tarqui</b>	78
<b>Tomebamba</b>	73
<b>Yanuncay</b>	74
<b>Collay</b>	61
<b>Pindilig</b>	73

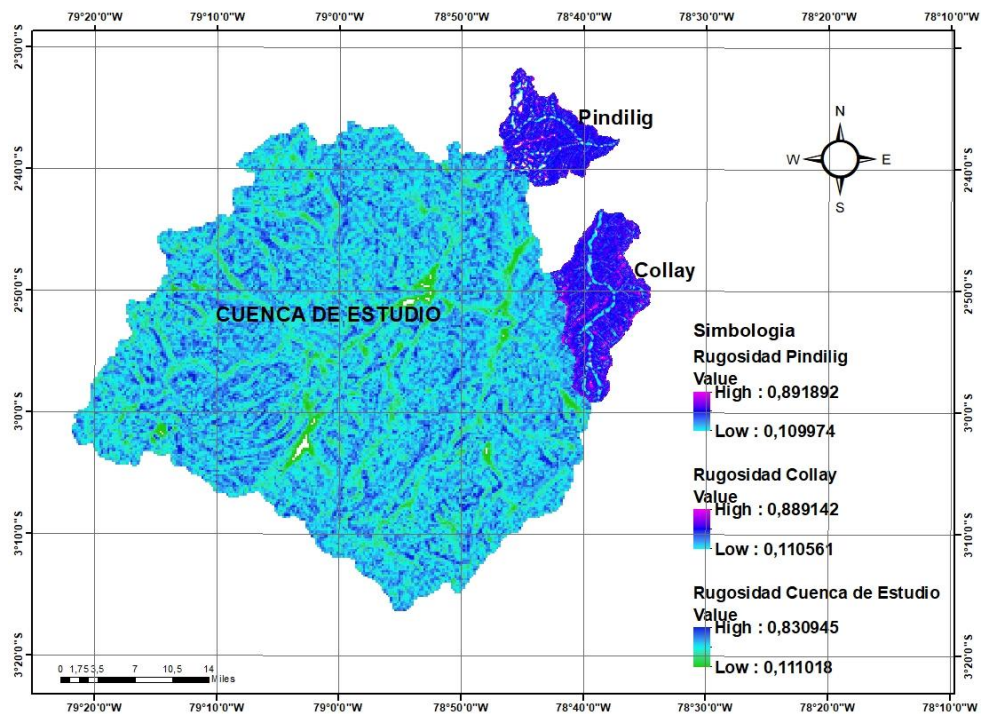
*Fuente: Elaboración Propia*

### 2.1.1.7 Índice de Rugosidad de la Cuenca de Análisis Numero de curva de Cuneca de análisis.

Este índice se refiere a la rugosidad de una cuenca, es decir, señala el grado de escarpado del relieve de la cuenca, indicando que un valor mayor de rugosidad se refiere a terrenos más accidentados.

La ilustración 15 describe la distribución de la rugosidad en el terreno, el cual depende de las elevaciones máximas y mínimas generadas por medio de un análisis estadístico focal utilizando la opción focal statistic en el software ArcGIS y relacionándolas a través de la herramienta de cálculo RASTER CALCULATOR.

$$\left( \frac{\text{“Smoothed”} - \text{“min\_DEM”}}{\text{“max\_DEM”} - \text{“min\_DEM”}} \right)$$



*Ilustración 15. Mapa de distribución de rugosidades.*

*Fuente: Elaboración Propia*

En la ilustración 14 se presentan las rugosidades las cuales poseen rangos representados por colores en los cuales la subcuenca de Pindilig el valor máximo de rugosidad de 0.89 y el

valor de 0.10 es el mínimo de rugosidad, de la misma manera en la subcuenca Collay el 0.88 representa la rugosidad máxima y 0.11 la mínima rugosidad. Asimismo, se representa la rugosidad en la cuenca de estudio teniendo 0.83 y 0.11 como valores máximos y mínimos correspondientemente.

Otra metodología para obtener la rugosidad de los cauces naturales fue a través de la tabla 28.

*Tabla 28: Elección de rugosidades según la U.S. Geological Survey.*

<b>Descripción de la corriente</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Normal</b>	<b>Máximo</b>
<b>A. Cauces naturales</b>			
A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida <30m)			
A.1.1 Cursos en planicies			
-Limpios, rectos, sin fallas ni pozos	0.025	0.030	0.033
-Rectos con algunas piedras y pastos	0.030	0.035	0.040
-Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos	0.033	0.040	0.045
-Meandros con algunas piedras y pastos	0.035	0.045	0.050
-Meandros con muchas piedras	0.045	0.050	0.060
-Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
-Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos y matorral.	0.075	0.100	0.150
A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida			
-Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
-Cauce de cantos rodados, con grandes rocas	0.040	0.050	0.070
A.2 Cursos en planicies inundadas			
A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos			
-Pasto corto	0.025	0.030	0.035
-Pasto alto	0.030	0.035	0.050

<b>Continuación) Tabla 28. Elección de rugosidades según la U.S. Geological Survey</b>			
<b>Descripción de la corriente</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Normal</b>	<b>Máximo</b>
<b>A.2.2 Zonas cultivadas</b>			
-Sin cultivo	0.020	0.030	0.030
-Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0.025	0.035	0.045
-Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica	0.030	0.040	0.050
<b>A.2.3 Zonas arbustivas</b>			
-Escasos arbustos y pasto abundante	0.035	0.050	0.070
-Pequeños árboles y arbustos sin follaje (parada invernal)	0.035	0.050	0.060
-Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)	0.040	0.060	0.080
-Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0.045	0.070	0.110
-Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0.070	0.100	0.160
<b>A.2.4 Zonas arbóreas</b>			
-Sauces densos, temporada invernal	0.110	0.150	0.200
-Terreno claro con ramas sin brotes	0.030	0.040	0.050
-Terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes	0.050	0.060	0.080
-Zonas de explotación maderera con árboles caídos poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
-Zonas de explotación madera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza a las ramas	0.100	0.120	0.160
<b>A.3 Cursos importante (ancho de la superficie libre en crecida &gt;30m)</b>			
En este caso, los valores del coeficiente n son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menos,			
-Sección regular sin rocas ni arbustos	0.025		0.060
-Sección irregular y rugosa	0.035		0.100

*Fuente: (U.S. Geological Survey, 1996).*

En función de la tabla 30 se puede asignar un valor de 0.040 a los cauces naturales, ya que cumplen con especificaciones de ubicación en zonas montañosas, que carecen de vegetación al fondo, laderas con pendientes pronunciadas y presentan vegetación y arbustos en las orillas que se sumergen en las crecidas y además existe presencia de canto rodado, gravas y pocas rocas en el fondo.

### 2.1.1.8 Tiempos de concentración.

El tiempo de concentración no es más que el tiempo que le toma a una gota de agua en recorrer desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida. Para el cálculo de estos parámetros se puede emplear diferentes métodos que relaciona diferentes parámetros de la cuenca como se observa en la tabla 29.

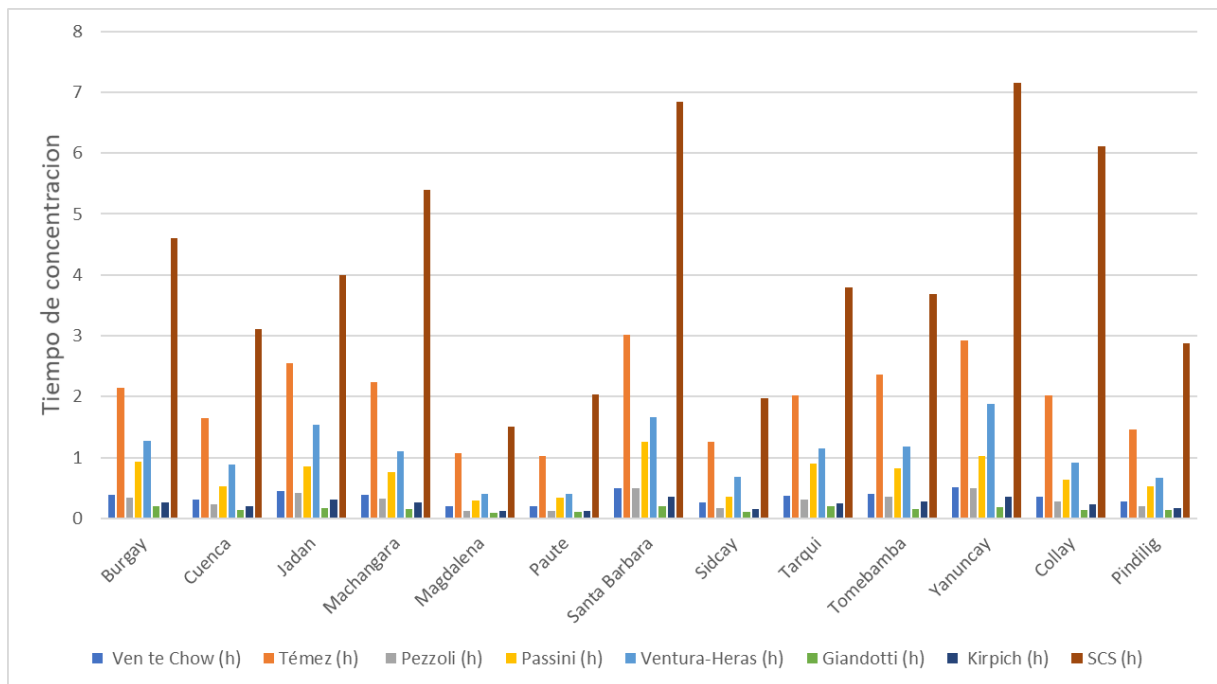
*Tabla 29: Tiempos de concentración.*

<b>Tiempos de Concentración</b>								
<b>Subcuenca</b>	<b>Vente Chow (h)</b>	<b>Témez (h)</b>	<b>Pezzoli (h)</b>	<b>Passini (h)</b>	<b>Ventura-Heras (h)</b>	<b>Giandotti (h)</b>	<b>Kirpich (h)</b>	<b>SCS (h)</b>
Burgay	0.391	2.150	0.335	0.924	1.272	0.196	0.267	4.606
Cuenca	0.311	1.640	0.235	0.529	0.889	0.136	0.203	3.110
Jadán	0.447	2.545	0.414	0.852	1.533	0.165	0.313	3.994
Machángara	0.389	2.243	0.332	0.758	1.105	0.153	0.265	5.392
Magdalena	0.207	1.071	0.124	0.291	0.406	0.095	0.124	1.505
Paute	0.202	1.029	0.119	0.339	0.395	0.113	0.120	2.038
Santa Barbara	0.501	3.012	0.493	1.251	1.668	0.207	0.359	6.838
Sidcay	0.255	1.265	0.172	0.352	0.687	0.110	0.159	1.974
Tarqui	0.370	2.025	0.308	0.907	1.150	0.199	0.249	3.786
Tomebamba	0.406	2.358	0.355	0.819	1.184	0.160	0.279	3.680
Yanuncay	0.505	2.916	0.499	1.028	1.885	0.183	0.362	7.159
Collay	0.352	2.025	0.285	0.635	0.914	0.136	0.235	6.103
Pindilig	0.275	1.467	0.193	0.521	0.667	0.139	0.174	2.883

*Fuente: Elaboración Propia*

Los métodos de Vente Chow, Témez, Pezzoli, Passini, Ventura – Heras, Giandotti, Kirpich expuestos en la sección 1.2.3.20, en sus ecuaciones emplean parámetros como la pendiente de las cuencas, pendiente de la cauce, longitud del cauce principal, longitud axial de

la cuenca, perímetro y área, entre estos métodos el de mayor relevancia es el Témez y Ventura - Heras ya que se tiene tiempos de concentración altos en comparación que el resto de métodos como se puede observar en la figura 15.



**Figura. 15 Tiempos de Concentración**

**Fuente: Elaboración propia**

Pero por otro lado el método SCS emplea el Numero de Curva para el cálculo del tiempo de concentración del cual este método es el que tiene mayor incidencia dentro de la cuenca debido que para la creación del número de curvas se empleada la textura del suelo y del cual se tiene valores más cercanos a la realidad.

### 2.1.1.9 Altura sobre el nivel del mar

En la tabla 30 se presentan la altura máxima y mínima sobre el nivel del mar de cada subcuenca, en donde los puntos más altos se encuentran en las subcuencas Machángara, Tomebamba y Yanuncay, mientras que el punto más bajo está ubicado en subcuenca Pindilig. Además se puede apreciar en la tabla 30 la frecuencia altimétrica este valor indica la altura

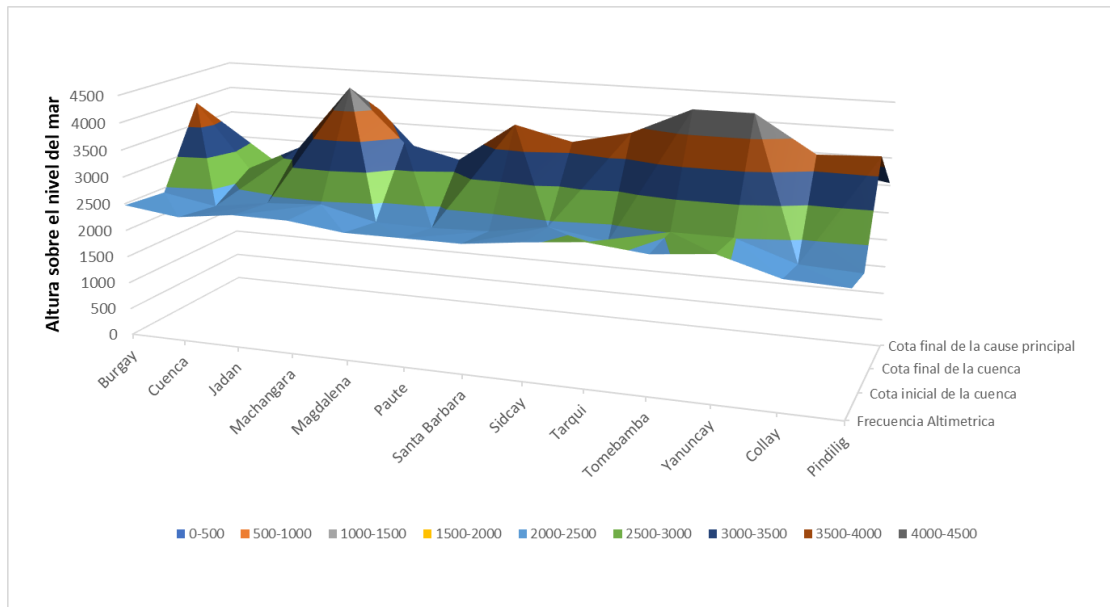
media de las áreas como mayor grado de incidencia entre curva hipsométricas con relación a la área total.

**Tabla 30: Cotas de la cuenca hidrográfica.**

<b>Subcuenca</b>	<b>Frecuencia Altimétrica</b>	<b>Cota inicial de la cuenca</b>	<b>Cota final de la cuenca</b>	<b>Cota final del cauce principal</b>
Burgay	2471.46	2412.5	3911.11	2987.5
Cuenca	2340.70	2237.5	2688.88	2452.7
Jadán	2472.05	2387.5	3177.77	2825
Machángara	2464.95	2453.04	4400	3750
Magdalena	2340.45	2212.5	3422.22	2712.5
Paute	2343.02	2200	3177.77	2237.5
Santa Barbara	2341.65	2237.5	3911.11	2862.5
Sidcay	2467.66	2412.5	3666.66	2787.5
Tarqui	2570.68	2250	3911.11	2264.19
Tomebamba	2465.92	2512.5	4400	3062.5
Yanuncay	2572.15	2512.5	4400	3612.5
Collay	2262.49	2150	3750	3216.667
Pindilig	2219.52	2100	3800	3044.444

*Fuente: Elaboración propia.*

En la figura 16 se puede observar la frecuencia altimétrica de la cuenca, es decir las elevaciones consecutivas, la altitud en ciertos puntos, así como las elevaciones de las cumbres, zonas llanas y depresiones.



**Figura. 16 Comparación de cotas y frecuencia altimétrica**

**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 16 se puede apreciar la variación de las elevaciones desde el punto más alto de cada subcuenca de estudio hasta la cota mínima, donde esta última será igual a la cota mínima del cauce principal, por el contrario, la elevación máxima de la subcuenca difiere máxima del cauce principal, este punto más alto de la subcuenca coincide con la divisoria. De la misma manera se puede apreciar la frecuencia altimétrica, es decir el valor común existente entre las cotas.

### 2.1.1.10 Longitudes

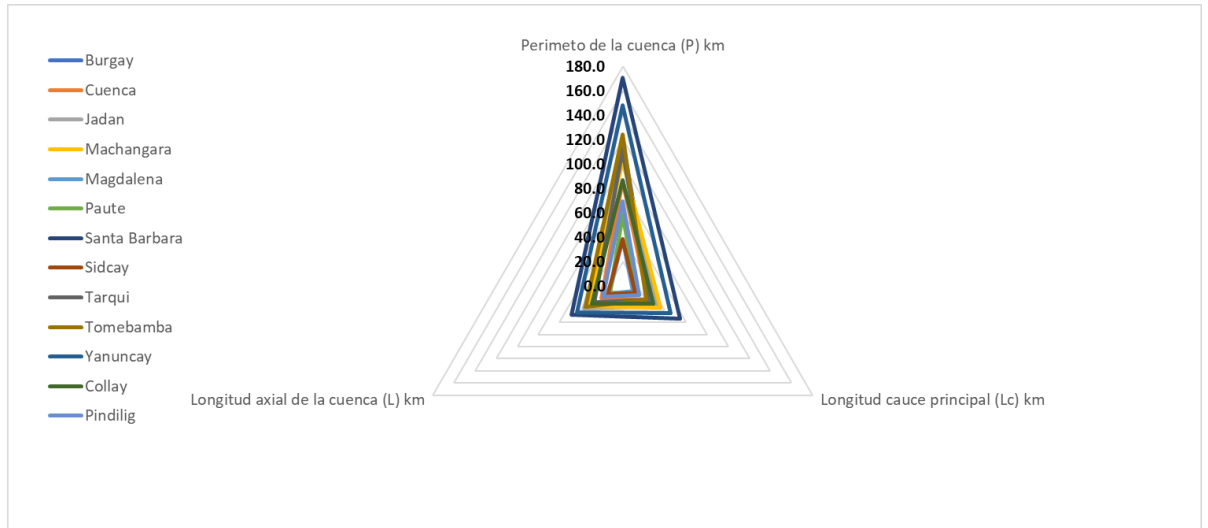
En la tabla 31 se presentan la longitud del perímetro, la longitud del cauce principal y la longitud axial de cada subcuenca, los cuales se utilizan para determinar parámetros como el coeficiente de elongación, factor de forma de Gravelius, la pendiente media del cauce principal, entre otros.

*Tabla 31: Longitudes de la cuenca*

<b>Subcuenca</b>	<b>Perímetro de la cuenca (P) km</b>	<b>Longitud cauce principal (Lc) km</b>	<b>Longitud axial de la cuenca (L) km</b>
Burgay	118.453	26.563	29.22
Cuenca	85.851	23.388	20.48
Jadan	104.051	32.885	36.91
Machángara	101.750	35.4732	32.99
Magdalena	37.920	9.3	12.59
Paute	57.944	13.453	11.85
Santa Barbara	170.483	54.054	48.23
Sidcay	38.263	11.46	14.16
Tarqui	110.933	23.528	27.22
Tomebamba	123.911	22.545	35.18
Yanuncay	148.004	45.232	43.74
Collay	86.374	29.241	29.383
Pindilig	68.818	15.414	18.527

*Fuente: Elaboración propia*

En la figura 17 se observa que el perímetro conjuntamente con la longitud del cauce principal y axial de las subcuencas siguen un patrón de aumento, de los cuales los valores más representativos pertenecen a la cuenca Santa Barbara.

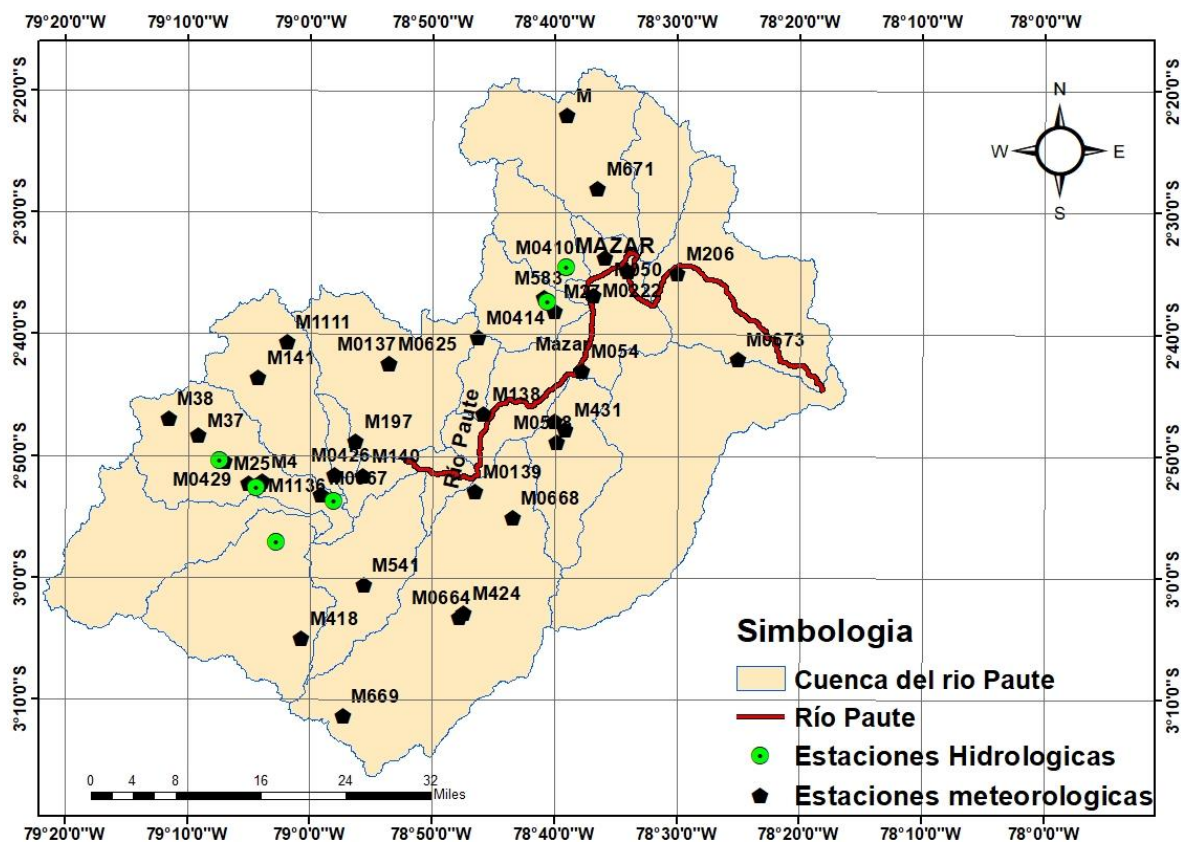


**Figura. 17 Comparación radial de longitudes**

*Fuente: Elaboración propia*

### 2.1.2 Parámetros hidrológicos

En el Ecuador la institución encargada de registrar y publicar información hidrometeorológica es el INAMHI, a través del cual se localizó las estaciones pertenecientes a la cuenca del Rio Paute, para ello se realizó una revisión de la biblioteca de la institución de lo cual se obtuvo como resultado 44 estaciones hidrológicas y 31 estaciones meteorológicas, como se presenta en la ilustración 16.



*Ilustración 16. Mapa de estaciones Hidrometeorológicas*

*Fuente: Elaboración propia*

Las estaciones hidrológicas expuestas en la ilustración 16 se describen en el listado de la tabla 32.

*Tabla 32: Estaciones Hidrológicas de la cuenca del Rio Paute.*

Estaciones Hidrológicas				
Código	Nombre	Ubicación UTM WGS84		
		Latitud	Longitud	Altitud
<b>M050</b>	Arenales	2.56167	78.59861	2200
<b>M0137</b>	Biblián inamhi	2.70694	78.89167	2610
<b>M0625</b>	Biblián Incel	2.70694	78.89167	2610
<b>M4</b>	Buenos Aires	2.86750	79.06444	2790
<b>M031</b>	Cañar	2.55139	78.93750	3030
<b>M414</b>	Chanin	2.67111	78.77167	3300
<b>M1111</b>	Chanlud	2.67694	79.03139	3440
<b>M0665</b>	Chaucha	2.91250	79.41389	1880
<b>M541</b>	Cochapamba	3.00944	78.92667	2710
<b>M0673</b>	Copal	2.70000	78.41667	1940

<b>(Continuación) Tabla 32. Estaciones Hidrológicas de la cuenca del Río Paute.</b>				
<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Ubicación UTM WGS84</b>		
		<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>
<b>M0067</b>	Cuenca Aeropuerto	2.88611	78.98500	2516
<b>M0426</b>	Cuenca Ricaurte	2.85889	78.96583	2540
<b>M418</b>	Cumbe	3.08278	79.01139	2715
<b>M0416</b>	El Pan	2.78556	78.66611	2560
<b>M669</b>	Gima	3.18944	78.95500	2770
<b>M0419</b>	Girón	3.15833	79.14639	2118
<b>M206</b>	Guarumales	2.58333	78.50000	1600
<b>M18</b>	Hondo huaico	2.48861	78.98361	2750
<b>M671</b>	Huangra	2.46667	78.60833	2710
<b>M0222</b>	Ingapata	2.61389	78.61361	2460
<b>M411</b>	Ingapirca	2.54444	78.86000	3080
<b>M197</b>	Jacarin	2.81306	78.93778	2690
<b>M141</b>	Labrado	2.72639	79.07111	3440
<b>M25</b>	Machángara	2.87111	79.08333	3000
<b>M26</b>	Manzana Huayco	2.52222	78.81139	2800
<b>M27</b>	Manzana Pata	2.63528	78.66667	2790
<b>M1136</b>	Matadero en Sayausi	2.87278	79.06806	2720
<b>M0139</b>	Gualaceo	2.88250	78.77556	2220
<b>M0668</b>	Mataglo Gulag	2.91778	78.72417	2710
<b>M054</b>	Palmas	2.71611	78.62972	2400
<b>M0538</b>	Pan Grande	2.81417	78.66444	2560
<b>M667</b>	Patul	2.72000	79.22972	3870
<b>M138</b>	Paute	2.77528	78.76417	2200
<b>M0217</b>	Peñas Coloradas	2.57972	78.56667	2120
<b>M583</b>	Pindilig	2.61639	78.68167	2760
<b>M37</b>	Piscicola Chirimachay	2.80472	79.15194	3350
<b>M38</b>	Quinuas	2.78194	79.19250	3670
<b>M0410</b>	Río Mazar	2.57500	78.65167	2440
<b>M40</b>	San Fernando	3.14167	79.25500	2750
<b>M431</b>	Sevilla de Oro	2.79722	78.65278	2360
<b>M424</b>	Sigsig Inamhi	3.04778	78.79028	2500
<b>M0664</b>	Sigsig Inecel	3.05361	78.79583	2380
<b>M0429</b>	Surucucho	2.84028	79.11639	3060
<b>M140</b>	Ucubamba	2.86111	78.92778	2400

*Fuente: Elaboración propia*

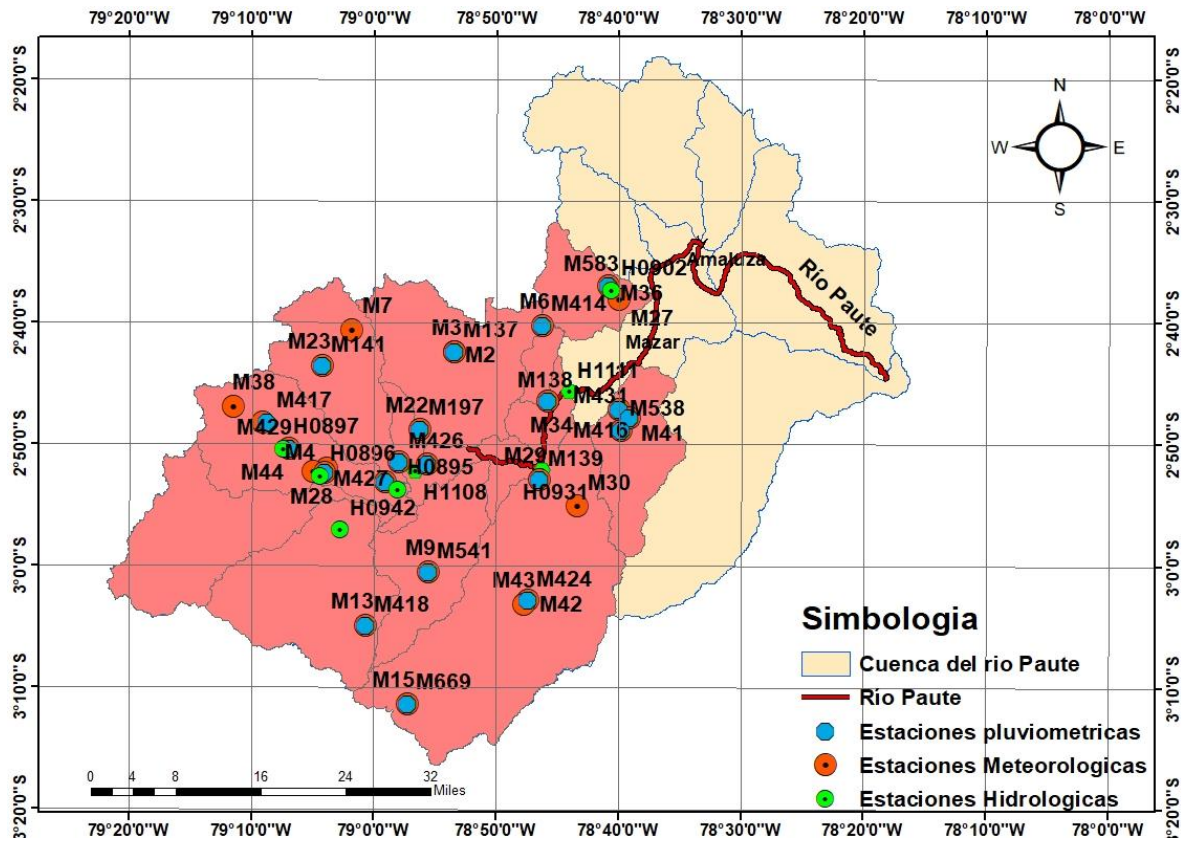
De igual manera las estaciones meteorológicas presentadas en la ilustración 16 son detalladas en el listado en la tabla 33.

*Tabla 33. Estaciones Meteorológicas de la cuenca del Rio Paute*

<b>Estaciones Meteorológicas</b>				
<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>Coordenadas</b>		
		<b>X SAM56</b>	<b>Y SAM56</b>	<b>Altura</b>
<b>M031</b>	Cañar	729337	9717806	3083
<b>M054</b>	Palmas	763544	9699524	2400
<b>M196</b>	Minas	685674	9631554	1040
<b>M206</b>	Guarumales	789292	9716006	1645
<b>M411</b>	Ingapirca	736323	9719146	3100
<b>M420</b>	Nabón	714881	9631285	2750
<b>M421</b>	Oña	705066	9616866	2320
<b>M667</b>	Patul	697952	9701418	3870
<b>M050</b>	Arenales	767038	9716603	2160
<b>M067</b>	Cuenca Aero	723991	9680793	2500
<b>M137</b>	Biblian	734407	9700592	2610
<b>M138</b>	Paute	748575	9693007	2200
<b>M139</b>	Gualaceo	747285	9681149	2220
<b>M140</b>	Ucubamba	730360	9683547	2400
<b>M141</b>	El Labrado	714444	9698474	3440
<b>M197</b>	Jacarin	729257	9688864	2690
<b>M217</b>	Peñas	770588	9714599	2120
<b>M410</b>	Rio Mazar	761132	9715139	2440
<b>M414</b>	Chanin	747762	9704531	3320
<b>M416</b>	El Pan	759480	9691849	2560
<b>M417</b>	Piscicola c	706121	9689978	3350
<b>M418</b>	Cumbe	721017	9659047	2715
<b>M424</b>	Sigsig	745550	9662870	2500
<b>M427</b>	Sayausi	714757	9682284	2720
<b>M429</b>	Surucucho	709389	9685887	3060
<b>M431</b>	Sevilla de Oro	760961	9690556	2360
<b>M538</b>	Pan grande	759659	9688684	2560
<b>M541</b>	Cochapamba-	730453	9667140	2710
<b>M583</b>	Pindilig	757786	9710567	2760
<b>M669</b>	Gima	727264	9647237	2770
<b>M671</b>	Huangra	765975	9727115	2710

*Fuente: Elaboración propia*

En la ilustración 17 se presentan las estaciones meteorológicas e hidrológicas que se encuentran dentro de la cuenca de estudio.



*Ilustración 17. Mapa de estaciones subcuena de análisis*

*Fuente: Elaboración propia*

Las estaciones meteorológicas obtenidas en la ilustración 17 se describen en la tabla 34.

*Tabla 34: Estaciones Meteorológicas de la subcuena análisis.*

Estaciones Meteorológicas dentro de la cuena de análisis				
Código	Nombre	Ubicación UTM WGS84		
		Latitud	Longitud	Altitud
M0137	Biblian inamhi	2.70694	78.89167	2610
M0625	Biblian inecel	2.70694	78.89167	2610
M4	Buenos aires	2.8675	79.06444	2790
M414	Chanin	2.67111	78.77167	3300
M1111	Chanlud	2.67694	79.03139	3440
M541	Cochapamba	3.00944	78.92667	2710
M0067	Cuenca aeropuerto	2.88611	78.985	2516
M0426	Cuenca Ricaurte	2.85889	78.96583	2540
M418	Cumbe	3.08278	79.01139	2715
M0416	El Pan	2.78556	78.66611	2560

<b>(Continuación) Tabla 34. Estaciones Meteorológicas de la cuenca del Rio Paute.</b>				
<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Ubicación UTM WGS84</b>		
		<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>
<b>M669</b>	Gima	3.18944	78.955	2770
<b>M197</b>	Jacarin	2.81306	78.93778	2690
<b>M141</b>	Labrado	2.72639	79.07111	3440
<b>M25</b>	Machángara	2.87111	79.08333	3000
<b>M27</b>	Manzana pata	2.63528	78.66667	2790
<b>M1136</b>	Matadero en sayausi	2.87278	79.06806	2720
<b>M0139</b>	Gualaceo	2.8825	78.77556	2220
<b>M0668</b>	Mataglo gulag	2.91778	78.72417	2710
<b>M054</b>	Palmas	2.71611	78.62972	2400
<b>M138</b>	Paute	2.77528	78.76417	2200
<b>M583</b>	Pindilig	2.61639	78.68167	2760
<b>M37</b>	Piscicola Chirimachay	2.80472	79.15194	3350
<b>M38</b>	Quinuas	2.78194	79.1925	3670
<b>M431</b>	Sevilla de Oro	2.79722	78.65278	2360
<b>M424</b>	Sigsig Inamhi	3.04778	78.79028	2500
<b>M0664</b>	Sigsig Inecel	3.05361	78.79583	2380
<b>M0429</b>	Surucucho	2.84028	79.11639	3060
<b>M140</b>	Ucubamba	2.86111	78.92778	2400

Fuente: Elaboración propia

Además, en el caso de las estaciones hidrológicas dispuestas en la ilustración 17 se presenta un listado en la tabla 35.

*Tabla 35: Estaciones hidrológicas de la subcuenca análisis.*

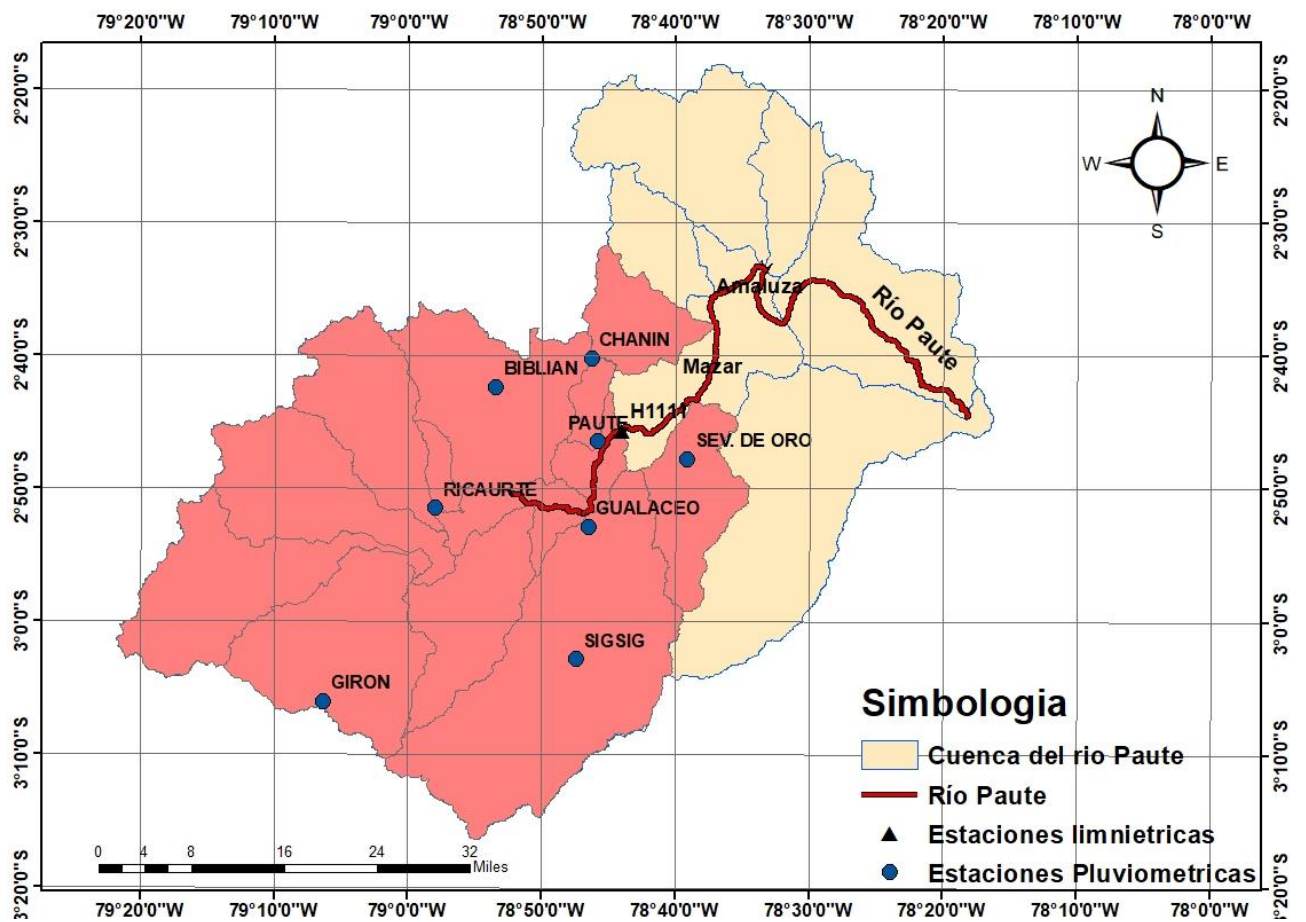
<b>Estaciones Hidrológicas dentro de la cuenca de análisis</b>				
<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Ubicación UTM WGS84</b>		
		<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>
<b>M054</b>	Palmas	-2.715056	-78.62963076	2400
<b>M067</b>	Cuenca Aero	-2.884993	-78.95549614	2500
<b>M137</b>	Biblian	-2.705892	-78.89158491	2610
<b>M138</b>	Paute	-2.774205	-78.76408452	2200
<b>M139</b>	Gualaceo	-2.881383	-78.77547787	2220
<b>M140</b>	Ucubamba	-2.86	-78.92770108	2400
<b>M141</b>	El Labrado	-2.725336	-79.07104362	3440
<b>M197</b>	Jacarin	-2.811965	-78.93770439	2690
<b>M414</b>	Chanin	-2.670081	-78.77158507	3320
<b>M416</b>	El Pan	-2.784478	-78.66602781	2560
<b>M417</b>	Piscicola c	-2.802247	-79.14576416	3350

<b>(Continuación) Tabla 35. Estaciones Hidrológicas de la cuenca del Rio Paute.</b>				
<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Ubicación UTM WGS84</b>		
		<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>
<b>M418</b>	Cumbe	-3.081579	-79.01131882	2715
<b>M424</b>	Sigsig	-3.046595	-78.79074999	2500
<b>M427</b>	Syausi	-2.871661	-79.06798956	2720
<b>M429</b>	Surucucho	-2.839176	-2.839176	3060
<b>M431</b>	Sevilla de Oro	-2.796135	-78.65269081	2360
<b>M538</b>	San Grande	-2.813074	-78.66436199	2560
<b>M541</b>	Cochapamba	-3.008277	-78.92659154	2710
<b>M583</b>	Pindilig	-2.615372	-78.68157738	2760
<b>M669</b>	Gima	-3.188207	-78.95492558	2770

*Fuente: Elaboración propia*

Una vez realizado la obtención de estaciones meteorológicas e hidrológicas en la cuenca del Rio Paute se procede a seleccionar las estaciones que se encuentren dentro de la cuenca de análisis, la identificación se llevó a cabo mediante dos tipos de puntos, de los cuales los primeros hacen referencia a las estaciones que cuentan con todos los registros de datos desde el año 2005 hasta el 2015 y los segundos se enfocan a la cantidad de datos faltantes.

En función de los datos obtenidos de las diferentes estaciones dentro de la subcuenca de estudio se determinó 9 estaciones hidrológicas del tipo pluviométricas que cuentan con todos los datos, además se obtuvo 1 estación hidrológica de tipo Limnimétrica, sin embargo, esta cuenta con un 3.36% de datos faltantes para la cual será necesario un rellenado de datos, como se expone en la ilustración 18.



*Ilustración 18 Mapa de estaciones subcuena con datos completos*

*Fuente: Elaboración propia.*

A partir de la ilustración 18 se extrajo un listado de las estaciones pluviométricas que se encuentran dentro de la cuenca de análisis detallado en la tabla 36.

*Tabla 36: Estaciones pluviométricas de la subcuenca análisis.*

<b>Estaciones Pluviométricas procesadas</b>				
<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Ubicación UTM WGS84</b>		
		<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>
<b>M0139</b>	Gualaceo	2.8825	78.77556	2220
<b>M0138</b>	Paute	2.77528	78.76417	2200
<b>M0424</b>	Sigsig	3.04778	78.79028	2500
<b>M0426</b>	Cuenca Ricaurte	2.85889	78.96583	2540
<b>M431</b>	Sevilla de Oro	2.79722	78.65278	2360
<b>M0414</b>	Chanin	2.67111	78.77167	3300
<b>M0419</b>	Girón	3.15833	79.14639	2118
<b>M0137</b>	Biblian	2.70694	78.89167	2610
<b>M0410</b>	Río Mazar	2.575	78.65167	2440

*Fuente: Elaboración propia*

Además, de la ilustración 18 se obtuvo el listado de las estaciones Limnimétrica que se encuentran dentro de la cuenca de análisis, presentado en tabla 37.

*Tabla 37: Estaciones Limnimétricas de la subcuenca análisis.*

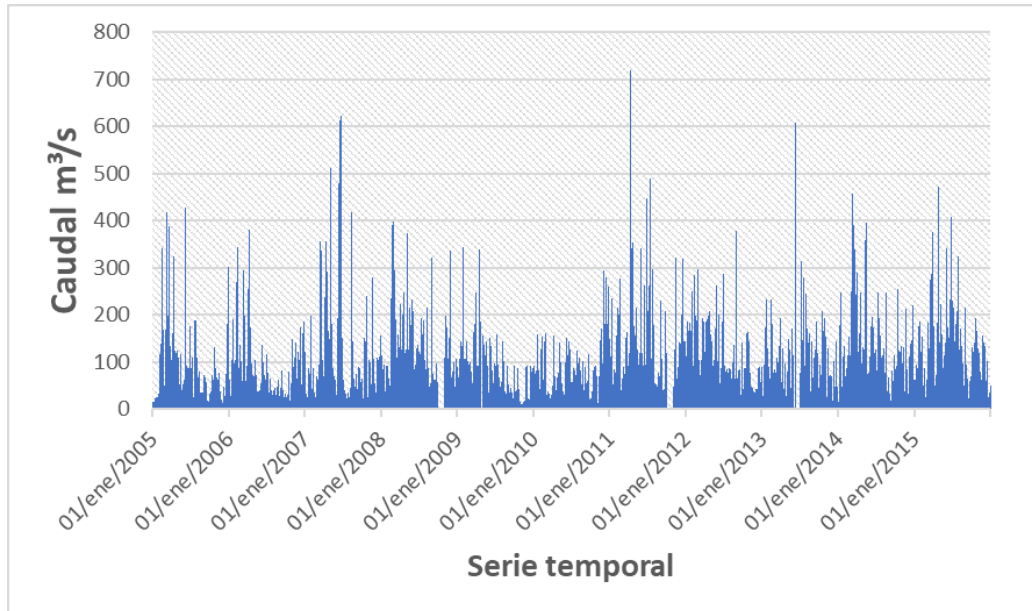
<b>Estaciones Limnimétricas procesadas</b>				
<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Ubicación UTM WGS84</b>		
		<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>
<b>H0892</b>	Mazar A.J. Paute	2.5325	78.5747	2602

*Fuente: Elaboración propia*

### **2.1.2.1 Rellenado de datos faltantes**

Para completar los datos faltantes de las estaciones, se empleó el método de los promedios, en donde se tomó como estación índice a la “estación Gualaceo-Palmar” ya que esta posee todos los datos completos, mientras que la estación incompleta fue de la estación “Paute en Paute”.

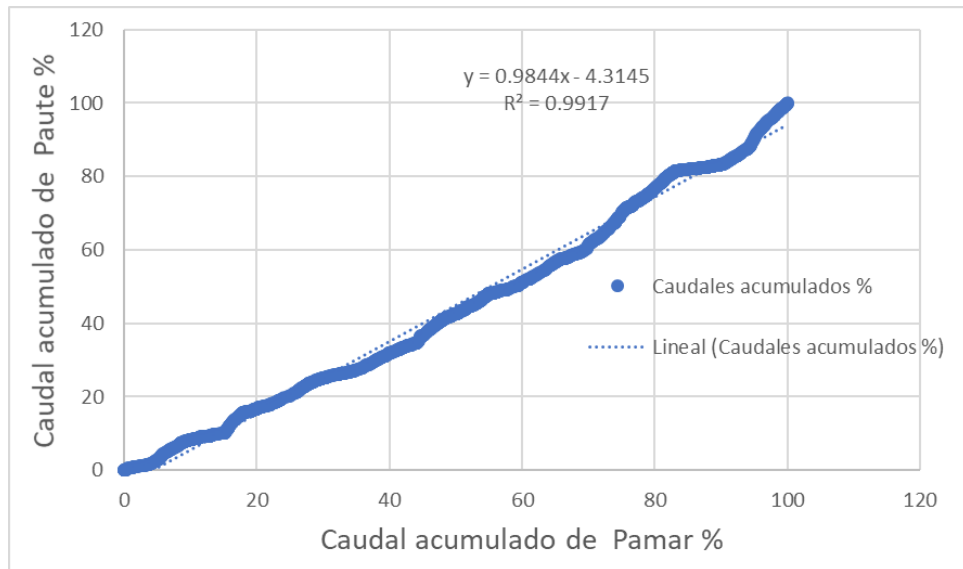
En la figura 18 se presentan los datos de caudal de la estación Paute en Paute donde se puede apreciar que al final del año 2009, 2012 y mediados del 2014 existen datos faltantes, para el cual se procedió a realizar un relleno de 135 datos, los cuales representan el 3.36% de los datos totales.



**Figura. 18. Caudales sin rellenar de la estación Paute.**

**Fuente: Elaboración propia**

Para corroborar la factibilidad del método, es decir verificar que este otorgue datos idóneos, es necesario realizar en primera instancia una curva de doble masa, la cual requiere establecer los valores acumulados de la estación índice y la estación incompleta, posibilitando así la obtención de los porcentajes de los datos señalados a partir de los cuales se crea un gráfico de dispersión cuya tendencia se ajuste a 45 grados, como se muestra en la figura 19.



**Figura. 19. Curva de doble masa**

**Fuente: Elaboración propia**

Posteriormente si la línea de tendencia cuenta con un ajuste lineal, se procede a aplicar el método de los promedios, el cual generalmente se emplea en series estocásticas, es decir que se originan en la naturaleza al azar como los datos de las estaciones.

Este método se basa en la relación de los promedios de los datos es igual a la relación de los datos parciales, obteniendo el promedio únicamente de los datos comunes entre las estaciones, mediante la siguiente ecuación:

$$y = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} x \tag{2.2}$$

Donde:

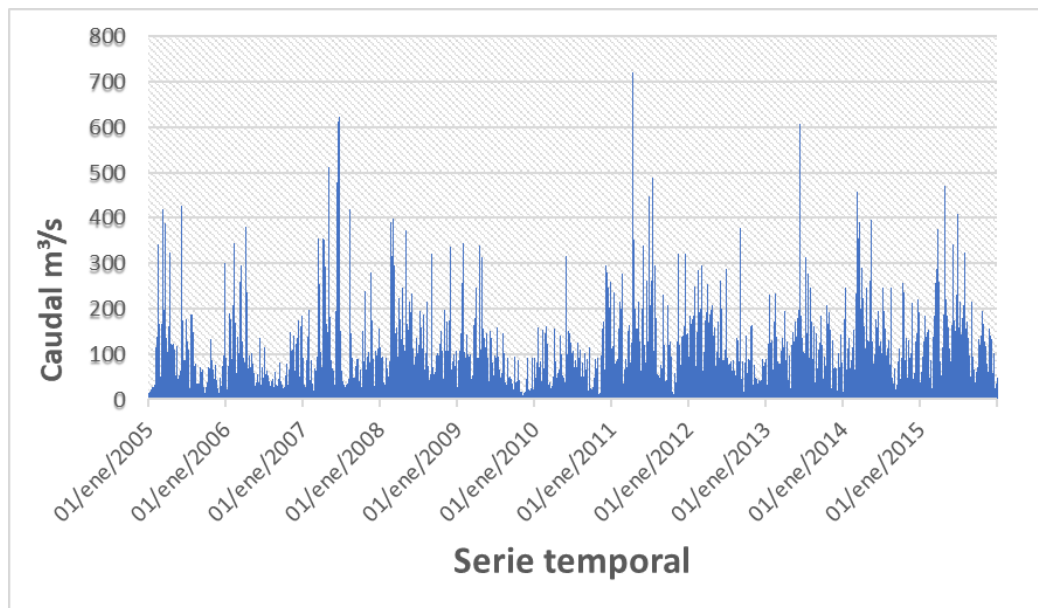
$\bar{y}$ : promedio lo datos de estación incompleta

$\bar{x}$ : promedio de los datos de estación índice

x: relación parcial de estación incompleta – Respectivo valor de x

y: relación parcial de los datos de estación índice – Dato faltante

Una vez aplicado el método de los promedios se puede apreciar en la figura 20 el relleno de los datos.



*Figura. 20. Relleno de datos de caudales de estación incompleta.*

*Fuente: Elaboración propia*

## **2.2 Simulación hidrológica de la cuenca**

La realización de un estudio hidrológico en una cuenca hidrográfica es una etapa de gran importancia en una modelación de eventos máximo y mínimos de lluvias. La comprensión de las condiciones de la zona de estudio, las características de la cuenca y del sistema fluvial permite identificación de un área analizada y determina la exactitud en una modelación (Estrada & Pacheco, 2012).

### **2.2.1 Aplicación del software HEC-HMS a la cuenca media y alta de río paute.**

Un modelo hidrológico tiene el propósito de representar de manera simplificada los diversos procesos que se desarrollan en una cuenca bajo ciertas condiciones, en función de un análisis matemático de los factores característicos de la zona estudiada, como su caudal, pendiente, uso de suelo, etc.

Actualmente se cuenta con una serie de softwares que realizan modelizaciones hidrológicas, entre los cuales sobresale el software de uso libre HEC-HMS (Hydrological Engineering Center –Hydrologic Modeling System), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EEUU (USACE). El modelo lluvia-escorrentía del presente trabajo se elaboró con dicho software.

El modelo se dispuso de forma que la delimitación de la cuenca de estudio, sus parámetros y morfometría se distribuyeran en 13 subcuencas (Burgay, Cuenca, Jadan, Machángara, Magdalena, Paute, Santa Barbara, Sidcay, Tarqui, Tomebamba, Yanuncay, Collay y Pindilig) hasta el embalse Mazar, zona de almacenamiento de aguas.

A continuación, se dispuso a establecer los factores climáticos de la cuenca, siendo el primer dato a evaluar la precipitación diaria, esto se logra a partir de la generación de las estaciones en el programa y la estimación de dichas precipitaciones en cada subcuenca. Para ello inicialmente debe establecer el área de cada subcuenca en un cuadro resumen de parámetros del HEC-HMS, como se muestra en la tabla 38.

**Tabla 38: Resumen de áreas de subcuencas.**

<b>Subcuenca</b>	<b>Área (KM2)</b>
MAGDALENA	50.616
TOMEBAMBA	380.024
SIDCAY	43.297
TARQUI	475.623
MACHANGARA	324.612
YANUNCAY	417.834
CUENCA	120.297
SANTA BARBARA	949.629
JADAN	297.518
PAUTE	81.063
BURGAY	446.546
COLLAY	239.367
PINDILIG	168.274

*Fuente: HEC-HMS.*

Para la estimación de las pérdidas de cada subcuenca se optó por el método del Servicio de Conservación de los Suelos (SCS), también conocido como el método del número de curva CN, el cual depende de la altura de lluvia efectiva, el volumen de precipitación total y el factor de número de curva, ya que estos inciden en el escurrimiento de la cuenca, uso de suelo y la condición antecedente de humedad. La tabla 39 se expone los datos requeridos por el programa.

*Tabla 39: Datos de requeridos para la estimación de pérdidas por el método SCS.*

<b>Subcuenca</b>	<b>Abstracción inicial (MM)</b>	<b>Número de Curva</b>	<b>Impermeable %</b>
MAGDALENA	13.428	79	20
TOMEBAMBA	18.325	74	20
SIDCAY	10.965	82	20
TARQUI	14.664	78	20
MACHANGARA	19.078	73	20
YANUNCAY	17.829	74	20
CUENCA	9.63	84	20
SANTA BARBARA	15.398	77	20
JADAN	9.625	84	20
PAUTE	13.205	80	20
BURGAY	17.175	75	20
COLLAY	32.837	61	20
PINDILIG	19.22	73	20

*Fuente: HEC-HMS*

La conversión de la precipitación neta a caudal, se seleccionó el método SCS Unit Hydrograph el cual requiere únicamente el tiempo de retardo de cada subcuenca, este parámetro de determino multiplicando el tiempo de concentración por 0.6, como se puede apreciar en la tabla 40.

**Tabla 40: Método de transformación SCS Hidrograma unitario.**

Subcuenca	Tipo de grafico	Tiempo de retraso (MIN)
MAGDALENA	Estándar	54.178
TOMEBAMBA	Estándar	132.474
SIDCAY	Estándar	71.05
TARQUI	Estándar	136.297
MACHANGARA	Estándar	194.121
YANUNCAY	Estándar	257.733
CUENCA	Estándar	111.946
SANTA BARBARA	Estándar	246.171
JADAN	Estándar	143.769
PAUTE	Estándar	73.351
BURGAY	Estándar	165.811
COLLAY	Estándar	366.2
PINDILIG	Estándar	172.956

*Fuente: HEC-HMS*

A continuación, se definió los parámetros hidrológicos de cada subcuenca, en la cual se agregaron 9 estaciones pluviométricas y 1 estación Limnimétrica esta única estación ayudará para la verificación de nuestro modelo.

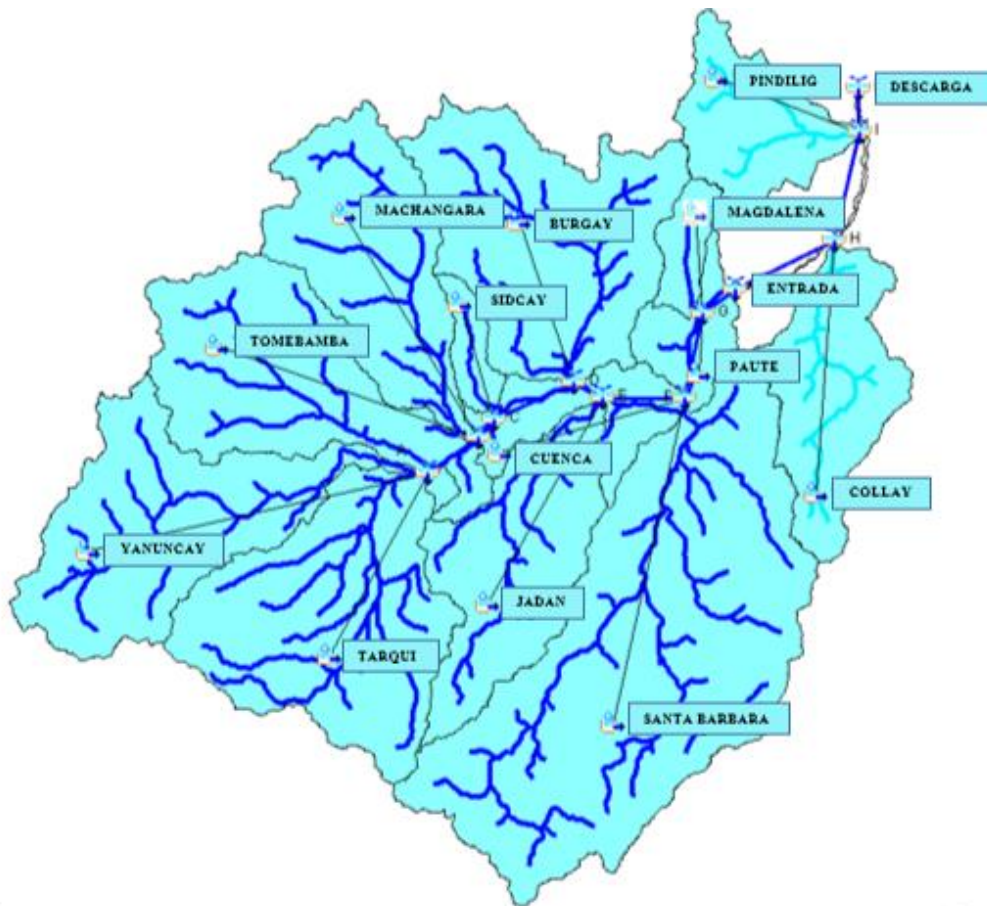
Además, para cada tramo se realizó el cálculo de los parámetros de Muskingum K y x para el cálculo de K se lo realizado empleando la fórmula alternativa que es 0.6 por el tiempo de concentración y valor de x se lo tomo 0.35 ya que son recomendadas para para pendientes medias altas, por lo general los tramos se encuentra ubicados en 3 subcuencas por los cual se calculó los parámetros los cuales se expresa en la tabla 41.

**Tabla 41. Valores de los parámetros de Muskingum.**

Muskingum		
Subcuenca	K	X
Tomebamba	2.207911583	0.35
Cuenca	1.8657774	0.35
Paute	1.2225267	0.35

*Fuente: Elaboración propia*

Una vez definidos los principales parámetros de cada subcuenca en el HEC-HMS se dispone del esquema preliminar (ilustración 19) para la simulación.



*Ilustración 19. Esquema preliminar del modelo hidrológico.*

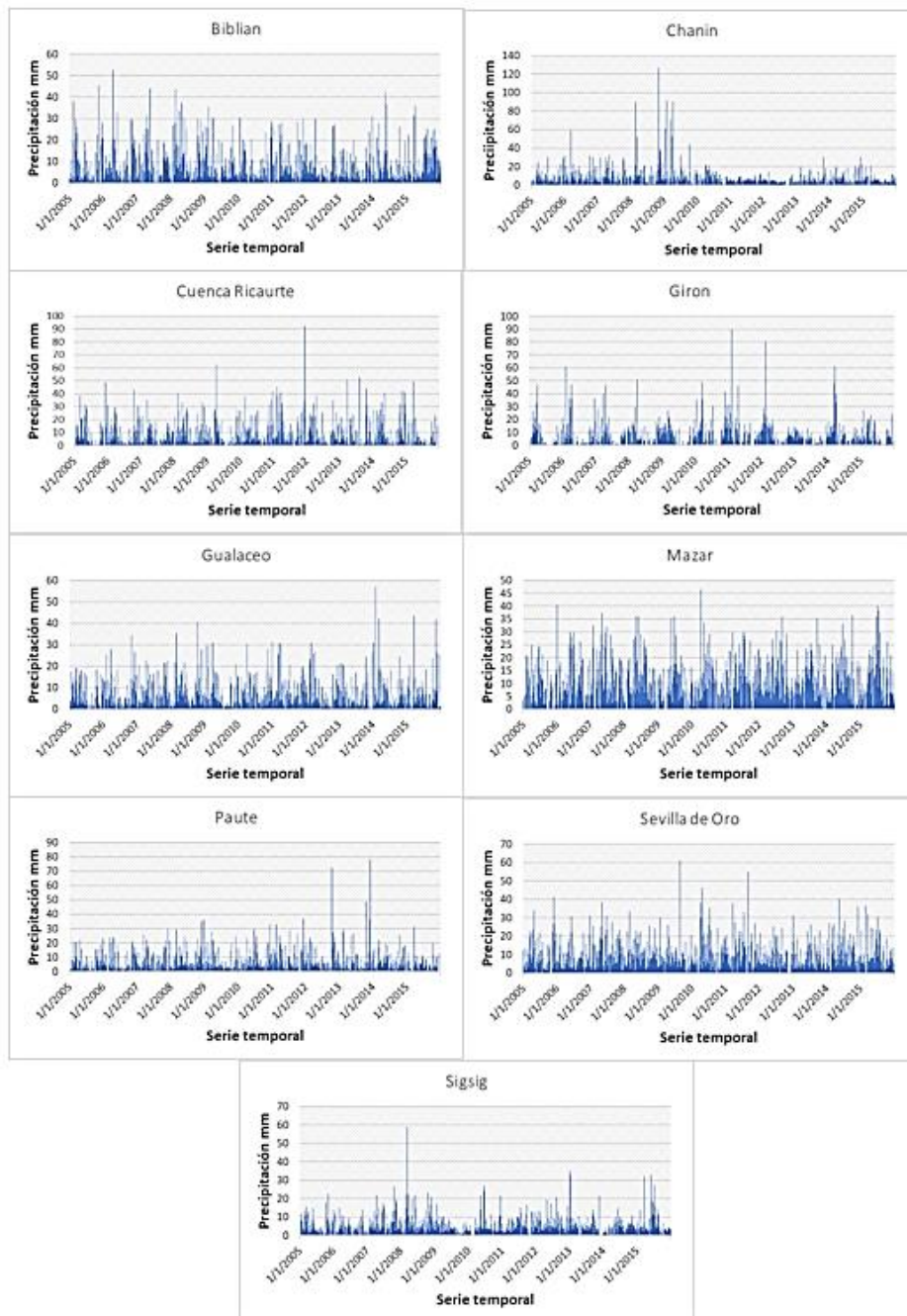
*Fuente: HEC-HMS*

En la ilustración 19 se puede observar el esquema preliminar, que refleja la integración de los parámetros hidrológicos y geomorfológicos de la cuenca de estudio, a partir del cual se obtiene el escurrimiento superficial de la cuenca hasta los puntos de interés.

### **2.2.1.1 Simulación**

Para la ejecución del modelo se procede a determinar la distribución de los hidrogramas de las subcuencas en todos los cauces, empleando el método Muskingum para simular exclusivamente la escorrentía superficial directa. Obteniendo así los histogramas de cada

subcuenca, en la figura 21 se exponen los hidrogramas de caudales observados al inicio del embalse.



*Figura. 21. Histograma de caudales observados del embalse.*

*Fuente: Elaboración propia*

Posteriormente, considerando que es indispensable la información meteorológica de la red de ríos y subcuencas se dispuso a cargar dichos datos desde el año 2005 hasta 2015, obteniendo así los hietogramas de las subcuencas.

Por último, para realizar la simulación del modelo hidrológico se asignó las especificaciones de control (tiempo y precipitación inicial), obteniendo así los resultados de caudal pico para cada subcuenca como se aprecia en la tabla 42.

*Tabla 42: Resultados de caudales pico del modelo hidrológico.*

<b>Elemento hidrológico</b>	<b>Área de drenaje (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Descarga pico (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Hora pico</b>	<b>Volumen (mm)</b>
I	3994,700	811,0	27-feb-2008, 00:00	10679,22
A	893,457	743,3	31-ene-2011, 00:00	11153,69
MAGDALENA	50,616	60,1	27-oct-2008, 00:00	11212,95
C	1641,390	633,4	31-ene-2011, 00:00	11025,47
D	2087,936	635,8	30-mar-2008, 00:00	11167,82
E	2385,454	604,6	30-mar-2008, 00:00	10872,96
F	3455,380	753,1	06-mar-2008, 00:00	10205,44
G	3587,059	767,3	27-feb-2008, 00:00	10199,98
H	3826,426	830,1	27-feb-2008, 00:00	10497,31
TOMBAMBA	380,024	313,4	14-dic-2011, 00:00	10335,05
SIDCAY	43,297	35,7	27-feb-2008, 00:00	10367,36
TRAMO G-ENTRADA	3587,059	766,5	27-feb-2008, 00:00	10205,04
TRAMO ENTRADA – H	3587,059	752,2	31-ene-2011, 00:00	10210,26
TARQUI	475,623	395,7	14-dic-2011, 00:00	11161,37
MACHANGARA	324,612	267,7	27-feb-2008, 00:00	10330,75

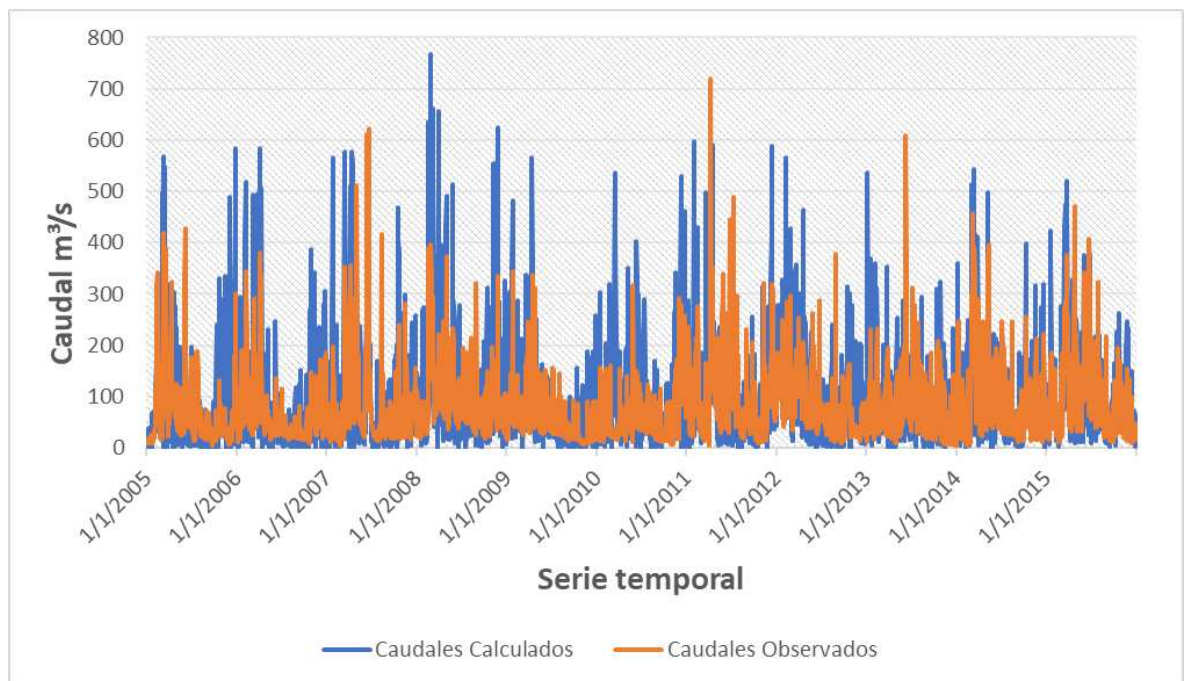
(Continuación) Tabla 42. Resultados caudales picos de las diferentes componentes.

Elemento hidrológico	Área de drenaje (Km <sup>2</sup> )	Descarga pico (m <sup>3</sup> /s)	Hora pico	Volumen (mm)
TRAMO F-G	3455,380	734,7	27-feb-2008, 00:00	10210,73
TRAMO E-F	2385,454	603,3	31-mar-2011, 00:00	10884,05
YANUCAY	417,834	347,6	31-ene-2011, 00:00	11144,96
TRAMO D-E	2087,936	602,8	30-mar-2008, 00:00	11191,60
CUENCA	120,297	59,0	25-ene-2014, 00:00	9338,95
ENTRADA	3587,059	766,5	27-feb-2008, 00:00	10205,04
SANTA BARBARA	949,629	490,7	06-mar-2008, 00:00	8610,55
TRAMA C-D	1641,390	589,9	31-ene-2011, 00:00	11077,42
TRAMO B-C	1598,093	632,8	31-ene-2011, 00:00	11043,29
JADAN	297,518	153,8	06-mar-2008, 00:00	8636,85
TRAMO A-B	893,475	657,6	31-ene-2011, 00:00	11420,59
B1	1598,093	668,5	31-ene-2011, 00:00	10941,08
PAUTE	81,063	54,6	28-nov-2013, 00:00	9109,29
BURGAY	446,546	213,0	11-abr-2006, 00:00	11500,10
COLLAY	239,367	126,5	26-ago-2009, 00:00	14798,91
TRAMO H-I	3826,426	807,9	27-feb-2008, 00:00	10499,10
PINDILIG	168,247	67,2	05-abr-2010, 00:00	14775,10
TRAMOS I-DESCARGA	3994,700	793,7	27-feb-2008, 00:00	10681,75
DESCARGA	3994,700	793,7	27-feb-2008, 00:00	10681,75

Fuente: HEC-HMS

La evaluación de la correlación existente entre el caudal pico y volumen acumulado de cada elemento de monitoreo y los caudales observados permite realizar consideraciones preliminares del modelo. Se realizó un relleno de 3.38% de datos faltantes.

Los datos de entrada considerados fueron exclusivamente lecturas de caudales del acceso al embalse desde el año 2005 hasta el 2015 como se muestra en la figura 22, considerando este punto como estratégico, puesto que abarca los registros de las subcuencas aguas arriba y facilita la calibración. El caudal máximo calculado que se presenta es de 766.5 m<sup>3</sup>/seg el 27 de febrero del 2008 y el mínimo de 0 m<sup>3</sup>/seg, mientras que el caudal pico observado es de 719.5 m<sup>3</sup>/seg y el mínimo de 3.9 m<sup>3</sup>/seg.



*Figura. 22 Análisis comparativos de información observada y simulada de entrada.*

*Fuente: Elaboración propia*

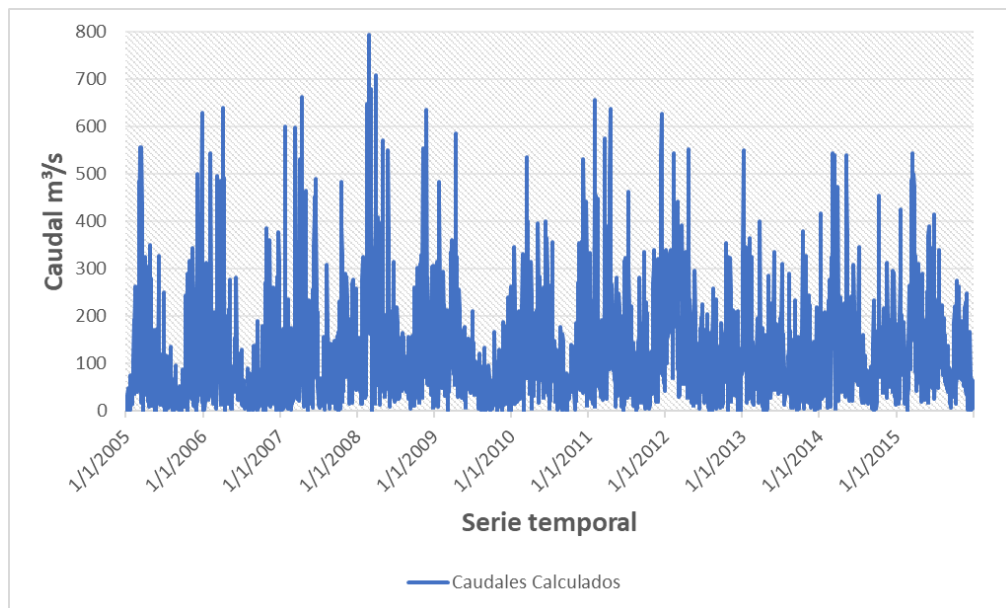
En la tabla 43 se presenta una comparación entre los valores obtenidos de la simulación inicial y los factores de correlación, con lo cual es posible deducir que dichos datos son insuficientes para la validación del modelo.

**Tabla 43: Factores de correlación en la simulación inicial.**

Parámetro	Nomenclatura	Valor mínimo	Valor máximo	Valor óptimo	Datos simulación inicial	Descripción
Error medio absoluto	MAE	0	$+\infty$	0	60.94	Insuficiente
Error medio relativo cuadrado	RMSE	0	$+\infty$	0	91.72	Insuficiente
Desviación media	BIAS	$-\infty$	$+\infty$	0	-24.1	Subestimación
Error medio	ME	0	$+\infty$	0	-25.38	Insuficiente
Valor normalizado del RMSE	NRMSE	0	$+\infty$	0	90.6	Insuficiente
Coefficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe	NSE	$-\infty$	1	1	0.18	Insuficiente
Coefficiente de correlación lineal o de Pearson	r	-1	1	1	0.52	Bueno
Coefficiente de determinación	R <sup>2</sup>	0	1	1	0.27	Insuficiente
Coefficiente de eficiencia de Kling-Gupta	KGE	0	1	1	0.38	Insuficiente

*Fuente: Elaboración propia*

En la figura 23 se observa que el caudal máximo calculado es de 793.7 m<sup>3</sup>/seg y el mínimo de 0 m<sup>3</sup>/seg.



**Figura. 23. Análisis comparativo de información observada y simulada de entrada.**

*Fuente: HEC-HMS*

En la figura 23 de los valores observados y simulados de descarga y de entrada se puede determinar que la diferencia entre caudal simulado y el observado no satisface los rangos aceptables en una modelación por lo que es imprescindible realizar una calibración y validación del modelo.

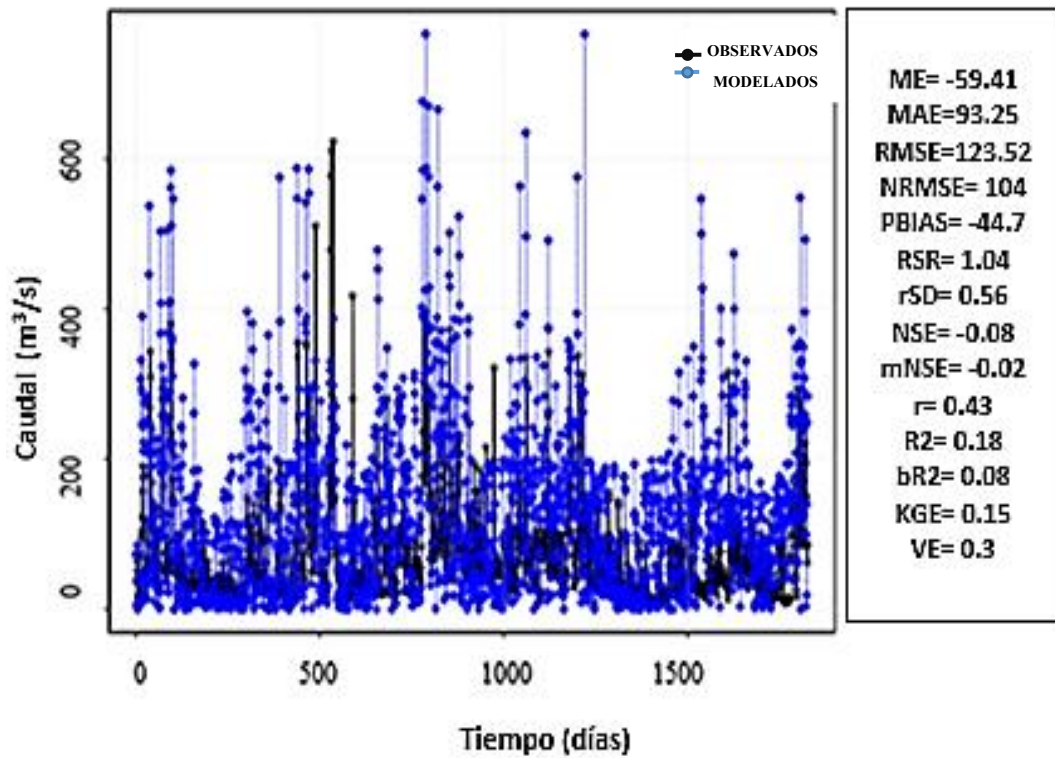
### **2.2.2 Análisis estadístico para la calibración del modelo implementado.**

Una vez determinado y programado el modelo se ejecuta de acuerdo al problema en cuestión. Para lo cual se requiere primeramente determinar los parámetros necesarios ya sean tomados en campo o calculados en base a información recopilada (Espinoza Vilca, 2018), generalmente los modelos disponen de los dos tipos de parámetros con el objetivo de generar las condiciones de la cuenca de estudio y los parámetros para el proceso de calibración (Claros Rocabado, 2018).

Se puede definir a la calibración como una fase fundamental en el proceso de modelación ya que expone la confiabilidad del modelo, es decir, a partir de diferentes métodos (MAE, ME, BIAS, etc.) que generan valores que a su vez se encuentran dentro de un rango determinado que indican que el modelo es adecuado lo cual contribuye a la optimización del manejo de la cuenca.

En el año 1998 Tucci definió a la optimización como la obtención de un mejor resultado que cumpla ciertas restricciones a partir de una o más variables. En los modelos hidrológicos la optimización se realiza a partir de técnicas iterativas en las que se ajustan ciertos parámetros hasta que se alcanzan los valores mínimos o máximos en la función (Castillo Sarmiento, 2019). El software de análisis estadístico RStudio que instaura la optimización de los valores de número de curva de las microcuencas para la calibración del modelo en un espacio autónomo de trabajo. En este modelo en la calibración se introdujo los valores desde el año 2005 al 2010.

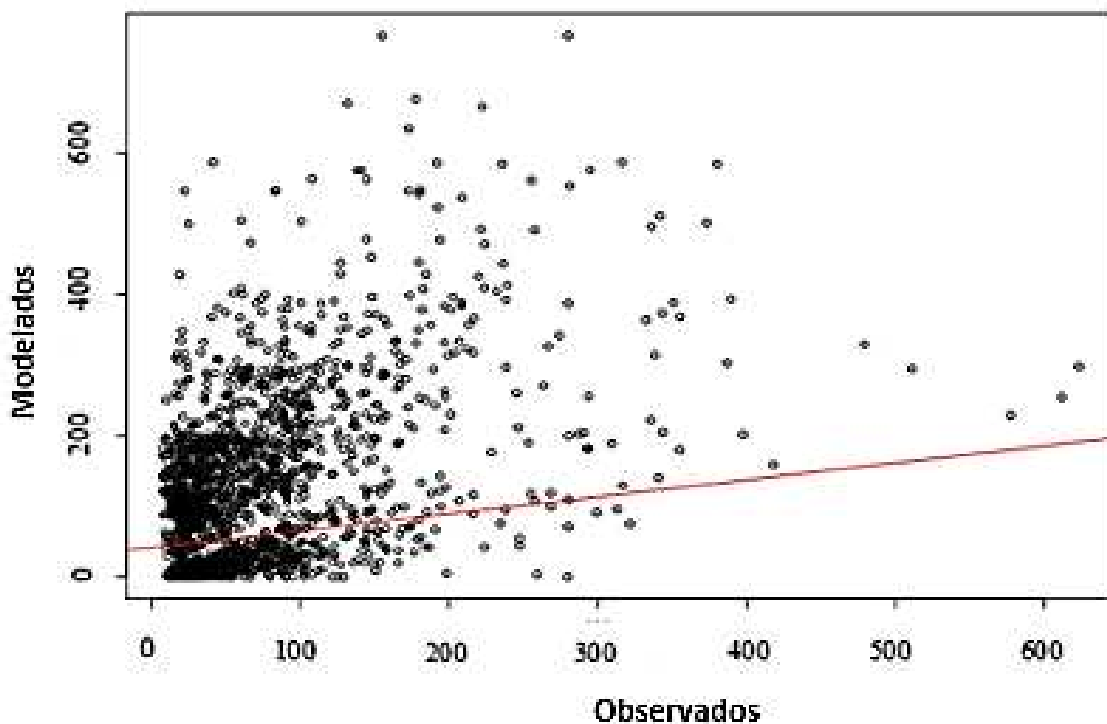
Para realizar la calibración se optó por realizar una variación entre el número de curvas y los valores de Muskingum calculados en el apartado de la modelación en HEC-HMS, se ejecutó la primera simulación obteniendo así los resultados expuestos en la figura 24.



*Figura. 24. Datos de entrada para la primera calibración.*

*Fuente: RStudio*

De la misma manera se presentan sus datos de dispersión de la figura 25 los cuales en un principio se observa que no posee un ajuste total a la línea de tendencia.



*Figura. 25. Datos dispersados de entrada para la primera calibración.*

*Fuente: RStudio*

Los resultados obtenidos de la primera simulación se compararon con los valores ideales de cada método de calibración en la tabla 44.

*Tabla 44: Tabla comparativa de datos de simulación inicial.*

Parámetro	Nomenclatura	Valor mínimo	Valor máximo	Valor optimo	Datos simulación inicial	Descripción
Error medio absoluto	MAE	0	$+\infty$	0	93.25	Insuficiente
Error medio relativo cuadrado	RMSE	0	$+\infty$	0	123.52	Insuficiente
Desviación media	BIAS	$-\infty$	$+\infty$	0	-44.7	Subestimación
Error medio	ME	0	$+\infty$	0	-59.41	Insuficiente
Valor normalizado del RMSE	NRMSE	0	$+\infty$	0	104	Insuficiente
Coefficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe	NSE	$-\infty$	1	1	-0.08	Insuficiente
Coefficiente de correlación lineal o de Pearson	r	-1	1	1	0.43	Bueno
Coefficiente de determinación	R <sup>2</sup>	0	1	1	0.18	Insuficiente

(Continuación) Tabla 44. Tabla comparativa de datos de simulación inicial.

Parámetro	Nomenclatura	Valor mínimo	Valor máximo	Valor optimo	Datos simulación inicial	Descripción
Coefficiente de eficiencia de Kling-Gupta	KGE	0	1	1	0.15	Insuficiente

*Fuente: Elaboración propia*

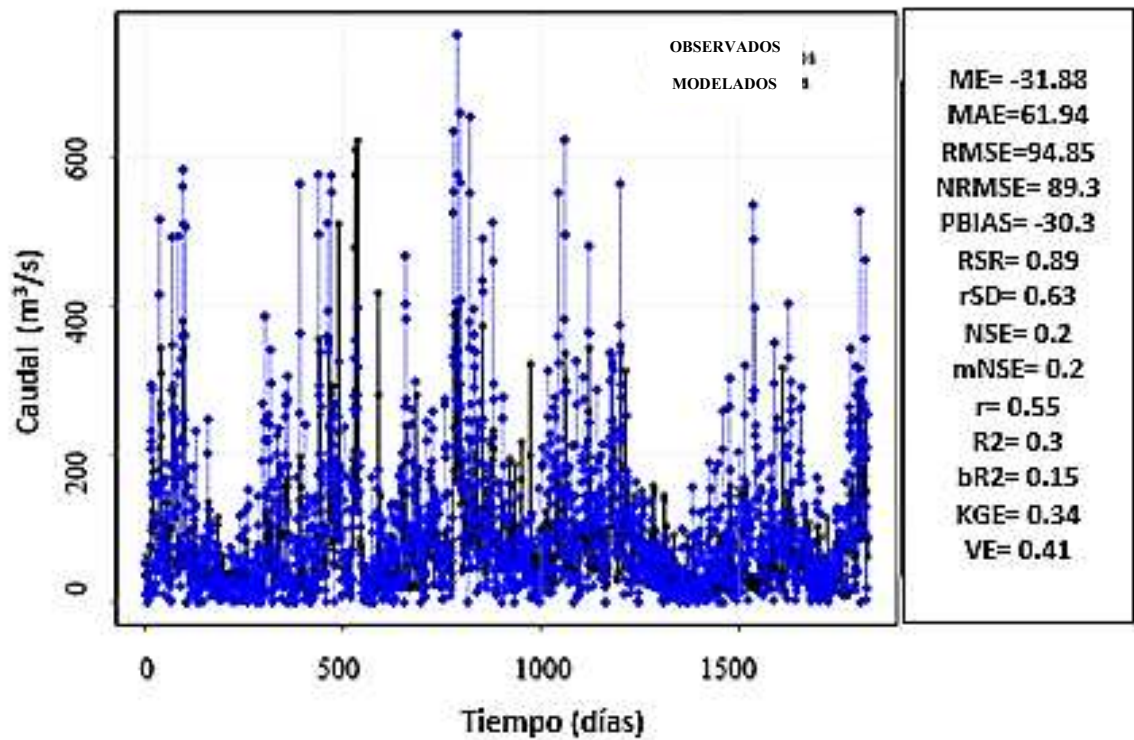
El error medio (ME), el error medio absoluto (MAE), el error medio relativo cuadrado (RMSE) y el valor normalizado de RMSE (NRMSE) como su nombre lo indica determina el porcentaje de error del modelo, es decir, indican la precisión existente entre los valores observados y pronosticados, en la tabla 46 indican estos valores en la simulación inicial, de los cuales MAE, RMSE y NRMSE se encuentran dentro de los rangos mientras que el ME es un valor negativo, lo cual se considera no es aceptable para este análisis.

Por otro lado, el sesgo (BIAS) determina la tendencia del modelo al sobreestimar o subestimar una variable, siendo que el valor de la tabla 46 es negativo significaría que la variable está siendo subestimada.

Del mismo modo los coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe y los coeficientes de eficiencia de Kling-Gupta describe si la representación de los valores simulados y observados en el modelo son aceptables, considerando que el valor de 1 es el ideal en la tabla 46 los valores iniciales se acercan a 1.

El coeficiente de determinación identifica la capacidad de predicción, siendo que 0 es un valor que representa la nula capacidad de predicción y el valor expuesto en la tabla 46 se acerca a dicho valor, se considera que en la simulación inicial el modelo posee una capacidad de predicción invalida. Mientras que el coeficiente de correlación de Pearson ayuda a determinar el grado de relación entre los valores observados y predichos no obstante los valores de la simulación inicial muestran una correlación positiva.

Considerando lo expuesto anteriormente fue necesario llevar a cabo una segunda simulación con lo que se obtuvo los resultados de la figura 26.



*Figura. 26. Datos de simulación calibrada.*

*Fuente: RStudio*

Del mismo modo en la figura 27 se presenta los datos dispersados después de un ajuste de información, en el que se puede observar una mejor adecuación a la línea de tendencia.

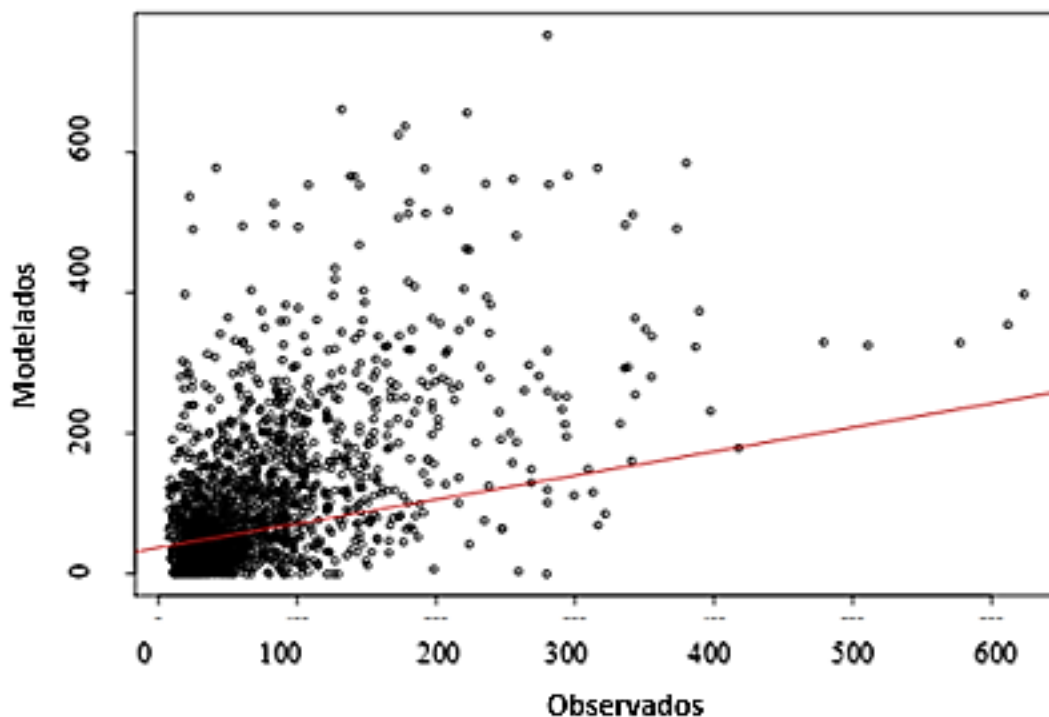


Figura. 27. Datos dispersados de simulación.

Fuente: RStudio

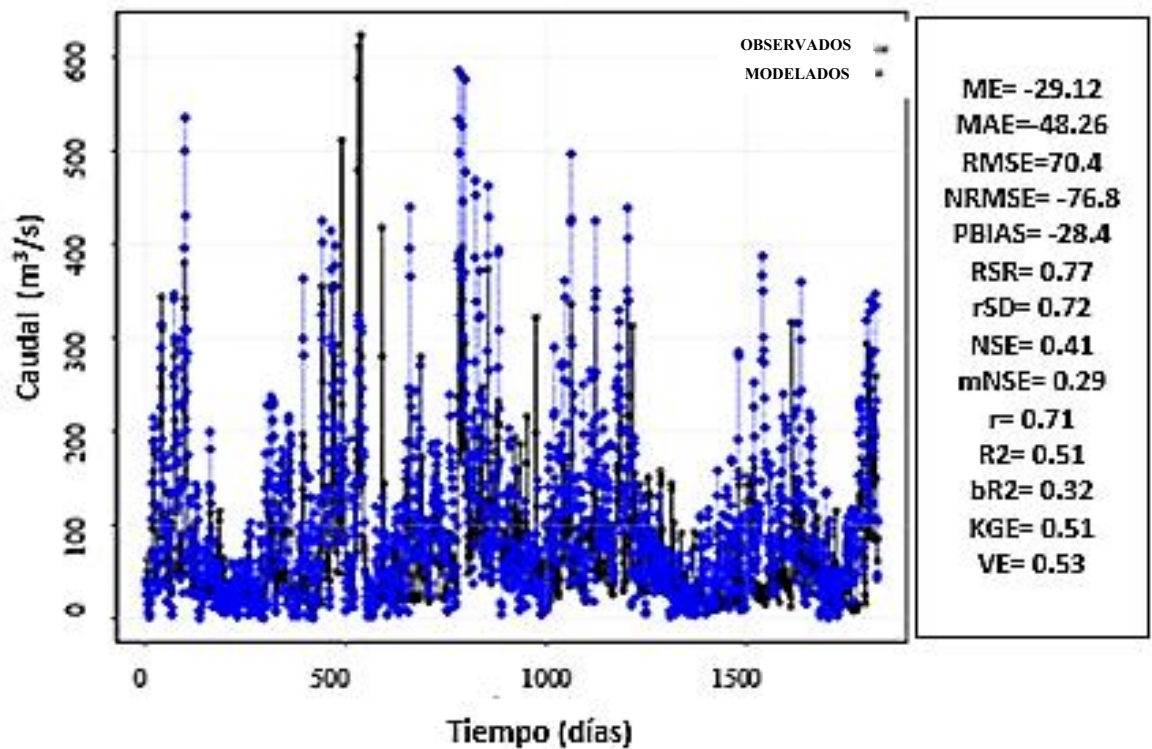
Con dichos datos se procedió a realizar la comparación de los valores resultantes con los valores óptimos de cada método, como se muestra en la tabla 45.

Tabla 45: Tabla comparativa de datos de simulación intermedia.

Parámetro	Nomenclatura	Valor mínimo	Valor máximo	Valor óptimo	Datos simulación intermedia	Descripción
Error medio absoluto	MAE	0	$+\infty$	0	61.94	Bueno
Error medio relativo cuadrado	RMSE	0	$+\infty$	0	94.85	Insuficiente
Desviación media	BIAS	$-\infty$	$+\infty$	0	-30.3	Subestimación
Error medio	ME	0	$+\infty$	0	-31.88	Insuficiente
Valor normalizado del RMSE	NRMSE	0	$+\infty$	0	89.3	Bueno
Coefficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe	NSE	$-\infty$	1	1	0.2	Satisfactorio
Coefficiente de correlación lineal o de Pearson	r	-1	1	1	0.55	Bueno
Coefficiente de determinación	R <sup>2</sup>	0	1	1	0.3	Satisfactorio
Coefficiente de eficiencia de Kling-Gupta	KGE	0	1	1	0.34	Bueno

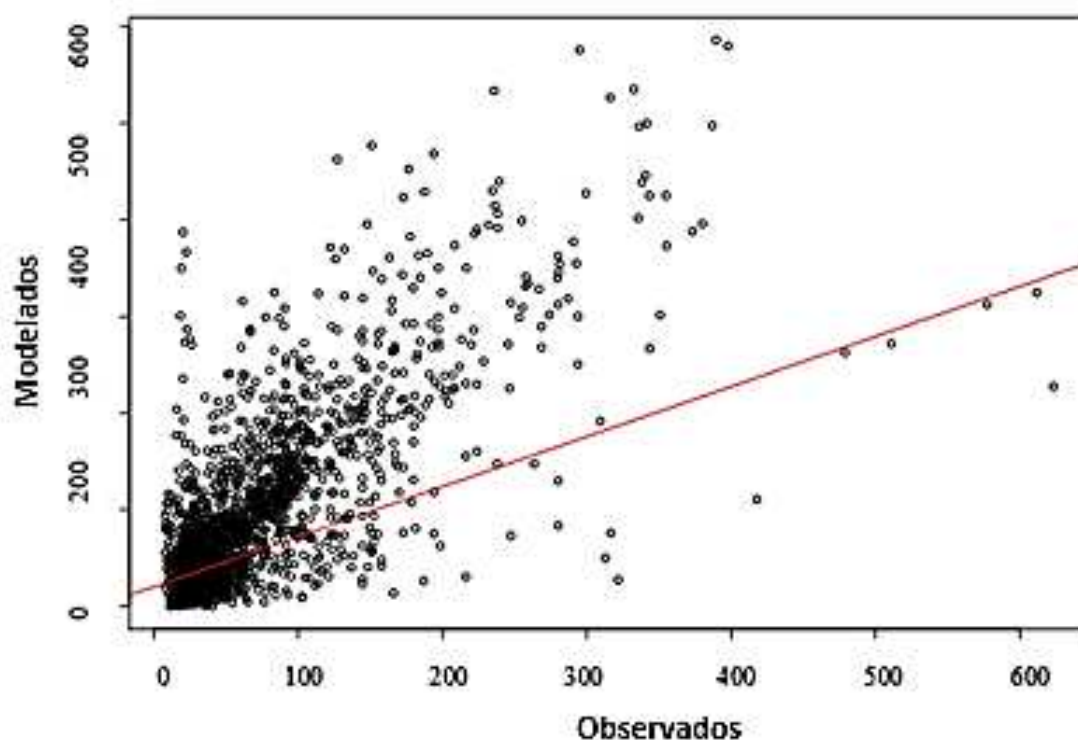
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 47 se observan los valores resultantes de una simulación intermedia en el que se han ajustado los valores del CN número de curva, con el fin de alcanzar los valores óptimos de la calibración, sin embargo, se puede observar la posibilidad de mejorar los resultados con una última simulación como se indica en la siguiente figura 28 junto con su respectivo gráfico de dispersión de datos (figura 29) en el cual ya se adapta en su mayoría a la línea de tendencia.



*Figura. 28. Datos finales calibrados de simulación.*

*Fuente: RStudio*



*Figura. 29. Gráfico de datos finales dispersados.*

*Fuente: Restudio*

En la tabla 46 se expone los valores finales que se encuentran en el rango aceptable de cada método, es decir, cumplen con los valores mínimos y máximos.

*Tabla 46: Tabla comparativa de datos de simulación final.*

<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor optimo</b>	<b>Datos simulación final</b>	<b>Descripción</b>
Error medio absoluto	MAE	0	$+\infty$	0	48.26	Bueno
Error medio relativo cuadrado	RMSE	0	$+\infty$	0	70.4	Bueno
Desviación media	BIAS	$-\infty$	$+\infty$	0	-28.4	Subestimación
Error medio	ME	0	$+\infty$	0	-29.12	insuficiente
Valor normalizado del RMSE	NRMSE	0	$+\infty$	0	76.8	Aceptable
Coefficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe	NSE	$-\infty$	1	1	0.41	Bueno
Coefficiente de correlación lineal o de Pearson	r	-1	1	1	0.71	Suficiente
Coefficiente de determinación	R <sup>2</sup>	0	1	1	0.51	Bueno
Coefficiente de eficiencia de Kling-Gupta	KGE	0	1	1	0.51	Bueno

*Fuente: Elaboración propia*

En la tabla 46 se observa los valores resultantes de la simulación final para los métodos MAE, RMSE, NRMSE son positivos, tomando en cuenta que su rango va desde 0 a  $+\infty$  dichos valores se consideran admisibles. Sin embargo, el método ME que posee el mismo rango se da un valor negativo lo que significa que los valores predichos se inclinan hacia una sub-predicción.

Del mismo modo se puede observar que los valores de los métodos BIAS y KGE de los cuales sus rangos son de  $-\infty$  a  $+\infty$ , y sus valores ideales son de 0 y 1 respectivamente, aunque los dos valores son aceptables el KGE se acerca más al ideal.

Por otra parte, dado que el valor de 1 en los métodos NSE,  $r$  y  $R^2$  es un indicador de una simulación perfecta de los caudales, el resultado del método del coeficiente de Pearson es el que más se acerca a dicho valor. Cabe recalcar que no hay una calibración ideal debido a que se realizó un relleno de datos del 3.36%.

También cabe mencionar como los valores de los diferentes parámetros varían desde la simulación al final, acercándose más a los valores ideales para obtener valores simulados que se acerquen más a la realidad. Es por ellos para llegar a los valores aceptables para una simulación los parámetros de Muskingum variaron como se observa en la tabla 47.

*Tabla 47: Parámetros Muskingum Calibrados.*

<b>Muskingum Calibrados</b>		
<b>Subcuenca</b>	<b>K</b>	<b>X</b>
Tomebamba	10	0.1
Cuenca	10	0.1
Paute	10	0.1

*Fuente: Elaboración Propia*

En comparación de la tabla 50 los valores del parámetro de Muskingum “K y X” variaron con respecto a la tabla en la tabla 43 de la sección 2.2 Simulación hidrológica de la cuenca 2.2 Simulación hidrológica de la cuenca para dicha calibración; modificando de la siguiente manera los valores de “K” en la subcuenca del Tomebamba de 2.2079 a 10, en la subcuenca de Cuenca de 1.865 a 10 y de la subcuenca de Paute de 1.22 a 10, de la misma manera el factor “X” varía de 0.35 a 0.1, en las subcuencas mencionadas.

El número de curva varía como se presenta en la tabla 48.

*Tabla 48: Numero de curva calibrados.*

<b>Subcuenca</b>	<b>CN Iniciales</b>	<b>CN Calibrados</b>
Magdalena	79	55
Tomebamba	74	50
Sidcay	82	58
Tarqui	78	54
Machángara	73	49
Yanuncay	74	55
Cuenca	84	60
Santa bárbara	77	53
Jadan	84	60
Paute	80	56
Burgay	75	50
Collay	61	61
Pindilig	73	73

*Fuente: Elaboración propia*

Al comparar los valores de la tabla 48 con los expuestos en la tabla 41 de la sección 2.2.1 Aplicación del software HEC-HMS a la cuenca media y alta de río paute., se puede observar que los valores de numero de curva disminuyen en las subcuencas a excepción de las subcuencas Collay y Pindilig que conservan el mismo CN.

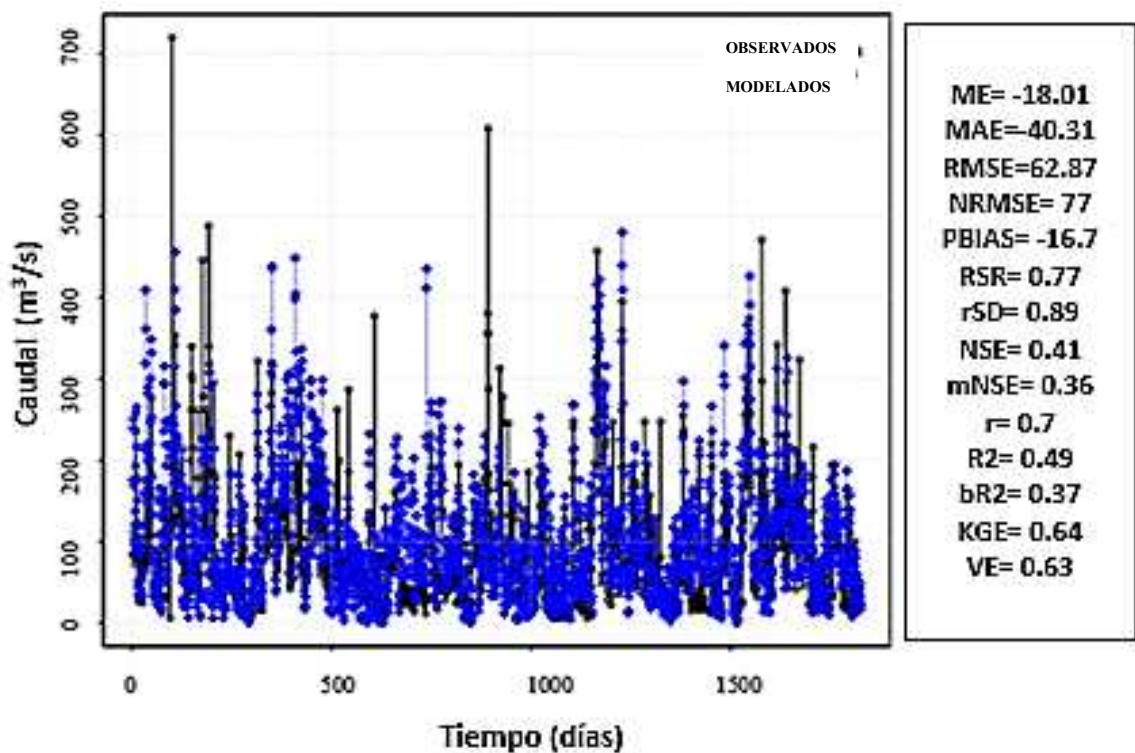
### **2.2.3 Análisis estadístico para la validación del modelo implementado**

Después del proceso de calibración es un proceso complejo y decisivo en el que se valida el modelo, para garantizar que los parámetros calibrados son correctos para diferentes

eventos o series de tiempo. Para este proceso el periodo de los datos debe diferir del utilizado en la calibración (Cabrera Balarezo, 2017).

La validación de un modelo debe ejecutarse para un sitio específico, ya que una validación generalizada se considera inválida.

Para la validación del modelo se empleó los parámetros calibrados en el periodo de 2010 a 2015 y se obtuvo los datos presentados en la figura 30.



*Figura. 30. Datos validados de simulación.*

*Fuente: RStudio*

En la tabla 49 se observa los resultados de la fase de validación en un periodo de 5 años con los nuevos valores del número de curva.

Se puede observar que el ME (error medio) genera valores negativos, esto se debe a que este método analiza datos que tienden a la media y dado que los valores de caudales entre el

observado y calculado tienen variación en ciertos puntos de la serie temporal, se concluye que este método no se ajusta para este tipo de análisis.

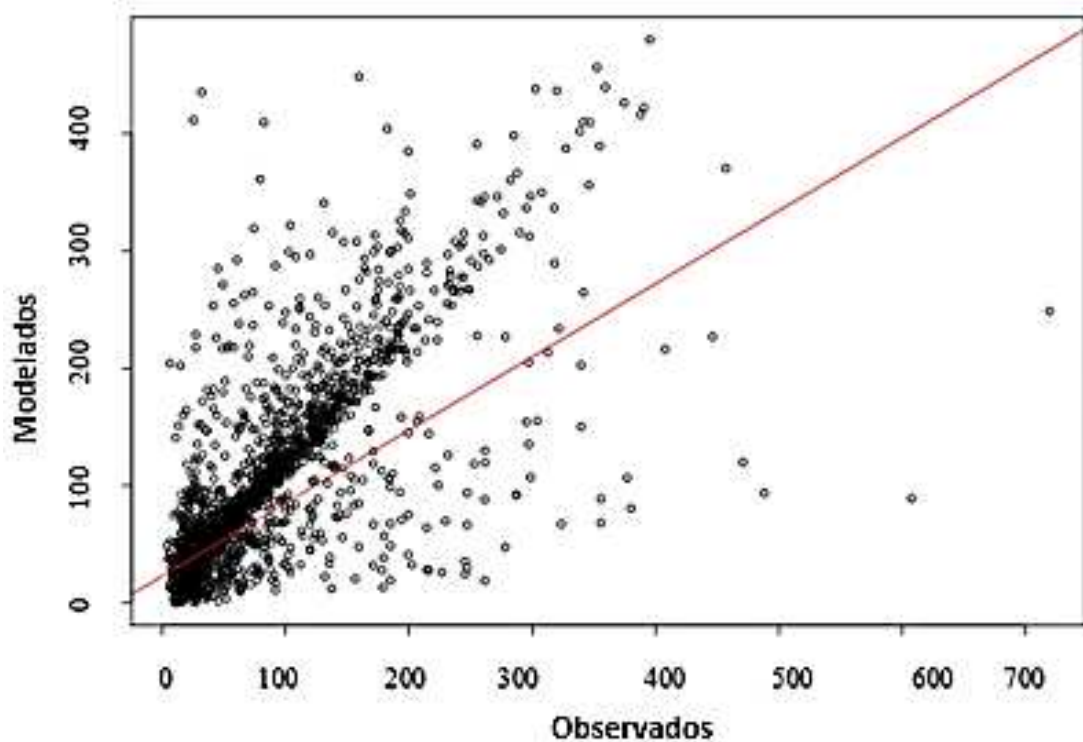
De la misma manera en el método BIAS (Desviación media) se basa en el cálculo de un error medio sistemático entre las predicciones y las observaciones, y puesto que los datos de caudales son variables se generan resultados negativos, por ende, se subestima las variables.

**Tabla 49: Tabla comparativa validación.**

<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor óptimo</b>	<b>Datos simulación final</b>	<b>Descripción</b>
Error medio absoluto	MAE	0	$+\infty$	0	40.31	Bueno
Error medio relativo cuadrado	RMSE	0	$+\infty$	0	62.87	Bueno
Desviación media	BIAS	$-\infty$	$+\infty$	0	-17.7	Subestimación
Error medio	ME	0	$+\infty$	0	-18.01	insuficiente
Valor normalizado del RMSE	NRMSE	0	$+\infty$	0	77	Aceptable
Coefficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe	NSE	$-\infty$	1	1	0.41	Bueno
Coefficiente de correlación lineal o de Pearson	r	-1	1	1	0.7	Suficiente
Coefficiente de determinación	R <sup>2</sup>	0	1	1	0.49	Bueno
Coefficiente de eficiencia de Kling-Gupta	KGE	0	1	1	0.64	Bueno

*Fuente: Elaboración propia*

En la siguiente figura 31 se observa el diagrama de dispersión los resultados estadísticos de los caudales simulados en función de los caudales observados en donde se expone la línea de tendencia.



*Figura. 31. Diagrama de dispersión.*

*Fuente: RStudio*

Se puede apreciar que en esta etapa el ajuste de los parámetros (CN) ha logrado la armonía entre los periodos de calibración y validación requerida para que sea posible que el modelo realice predicciones de la cuenca de estudio en periodos diferentes a los usados en la etapa de calibración.

#### **2.2.4 Presentación de resultado e hidrogramas.**

Una vez realizado la simulacion, calibracion y validacion del modelo se obtuvo datos de caudal pico en cada componente del modelo como se observa en la tabla 50, de la cual no se pretende realizar una analisis con sus periodos de retorno si no observar el aporte de caudales a la entrada y a la salida del embalse Mazar durante un periodo de tiempo.

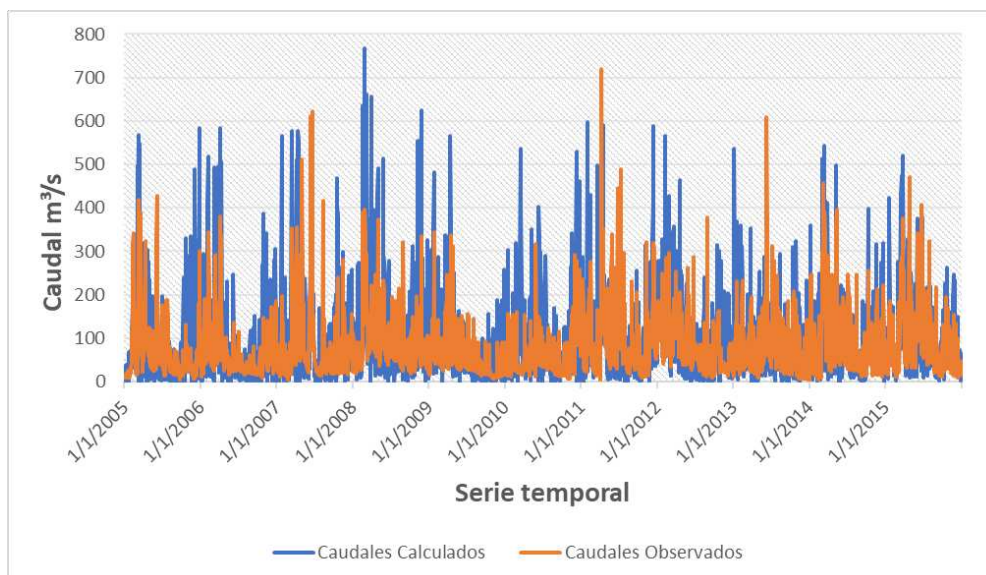
*Tabla 50: Resultados finales caudales picos de las diferentes componentes.*

<b>Elemento hidrológico</b>	<b>Área de drenaje (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Descarga pico (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Hora pico</b>	<b>Volumen (mm)</b>
I	3994,700	572,0	21-feb-2008, 00:00	10425,14
A	893,457	742,4	31-ene-2011, 00:00	11023,77
MAGDALENA	50,616	60,0	27-oct-2008, 00:00	11053,82
C	1641,390	530,0	01-feb-2008, 00:00	10674,10
D	2087,936	521,5	15-dic-2011, 00:00	10828,95
E	2385,454	497,8	19-feb-2008, 00:00	10537,24
F	3455,380	729,6	06-mar-2008, 00:00	9935,86
G	3587,059	617,5	07-mar-2008, 00:00	9928,96
H	3826,426	579,9	29-feb-2008, 00:00	10233,85
TOMBAMBA	380,024	313,3	14-dic-2011, 00:00	10270,54
SIDCAY	43,297	35,7	14-dic-2011, 00:00	10270,54
TRAMO G-ENTRADA	3587,059	586,3	20-feb-2008, 00:00	9928,74
TRAMO ENTRADA – H	3587,059	570,2	20-feb-2008, 00:00	9928,54
TARQUI	475,623	395,1	31-ene-2011, 00:00	10997,59
MACHANGARA	324,612	267,5	14-dic-2011, 00:00	10237,12
TRAMO F-G	3455,380	616,7	07-mar-2008, 00:00	9935,50
TRAMO E-F	2385,454	479,2	19-feb-2008, 00:00	10536,88
YANUCAY	417,834	3477,3	31-ene-2011, 00:00	11053,57
TRAMO D-E	2087,936	490,6	31-mar-2008, 00:00	10828,52
CUENCA	120,297	58,9	25-ene-2014, 00:00	9187,19
ENTRADA	3587,059	586,3	20-feb-2008, 00:00	9928,74

<b>(Continuación) Tabla 50. Resultados finales caudales pico de las diferentes componentes</b>				
<b>Elemento hidrológico</b>	<b>Área de drenaje (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Descarga pico (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Hora pico</b>	<b>Volumen (mm)</b>
SANTA BARBARA	949,629	489,0	06-mar-2008, 00:00	8520,93
TRAMA C-D	1641,390	485,1	15-dic-2011, 00:00	10674,31
TRAMO B-C	1598,093	529,8	01-feb-2011, 00:00	10685,03
JADAN	297,518	153,0	06-mar-2008, 00:00	8493,04
TRAMO A-B	893,475	508,6	01-feb-2011, 00:00	11024,02
B1	1598,093	646,2	14-dic-2011, 00:00	10685,01
PAUTE	81,063	54,6	28-nov-2013, 00:00	8947,86
BURGAY	446,546	210,3	11-abr-1006, 00:00	11397,34
COLLAY	239,367	126,5	26-ago-2009, 00:00	14809,11
TRAMO H-I	3826,426	562,3	21-feb-2008, 00:00	10233,58
PINDILIG	168,247	67,2	05-abr-2010, 00:00	14781,14
TRAMOS I-DESCARGA	3994,700	566,5	21-feb-2008, 00:00	10424,81
DESCARGA	3994,700	566,5	21-feb-2008, 00:00	10424,81

Fuente: HEC-HMS.

En la figura 32 se indica que existe una relación entre picos de caudales observados y calculados, este punto es clave para realizar la calibración y validación del modelo, ya que se logró obtener una estación antes de la entrada de la represa, denominada Paute en Paute, la cual brindó datos que incluyen el aporte de caudal de todas las subcuencas aguas arriba, siendo el máximo caudal calculado de 586.3 m<sup>3</sup>/seg y el mínimo de 0 m<sup>3</sup>/seg.



**Figura. 32** Hidrograma resultante de caudales a la entra del embalse Mazar. Fuente: HEC-HMS

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 51 se observa la correlación de datos de toda la serie temporal (desde el 2005 hasta el 2015), donde se puede comprobar efectividad del modelo, puesto que se encuentra dentro de los rangos admisibles de los factores de correlación, a excepción del ME (error medio) y el BIAS (Desviación media) dado que presentan valores negativos.

**Tabla 51:** Factores de correlación de datos.

Parámetro	Nomenclatura	Valor mínimo	Valor máximo	Valor optimo	Datos simulación final	Descripción
Error medio absoluto	MAE	0	$+\infty$	0	45.06	Bueno
Error medio relativo cuadrado	RMSE	0	$+\infty$	0	67.83	Bueno
Desviación media	BIAS	$-\infty$	$+\infty$	0	-21.9	Subestimación
Error medio	ME	0	$+\infty$	0	-22.52	insuficiente
Valor normalizado del RMSE	NRMSE	0	$+\infty$	0	77.8	Aceptable
Coefficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe	NSE	$-\infty$	1	1	0.39	Bueno
Error medio absoluto	MAE	0	$+\infty$	0	45.06	Bueno

(Continuación) Tabla 51. Factores de correlación de datos

Parámetro	Nomenclatura	Valor mínimo	Valor máximo	Valor optimo	Datos simulación final	Descripción
Coefficiente de determinación	$R^2$	0	1	1	0.47	Bueno
Coefficiente de eficiencia de Kling-Gupta	KGE	0	1	1	0.57	Bueno

Fuente: Elaboración propia

En la figura 33 se puede apreciar el hidrograma de la descarga del embalse Mazar donde se obtuvo un caudal pico de 566.5 m<sup>3</sup>/s, este hidrograma se empleará como dato de entrada al embalse Amaluza, esto se debe a la cercanía del embalse Mazar ya que se encuentra ubicado aproximadamente a 5 km aguas arriba del embalse Amaluza.

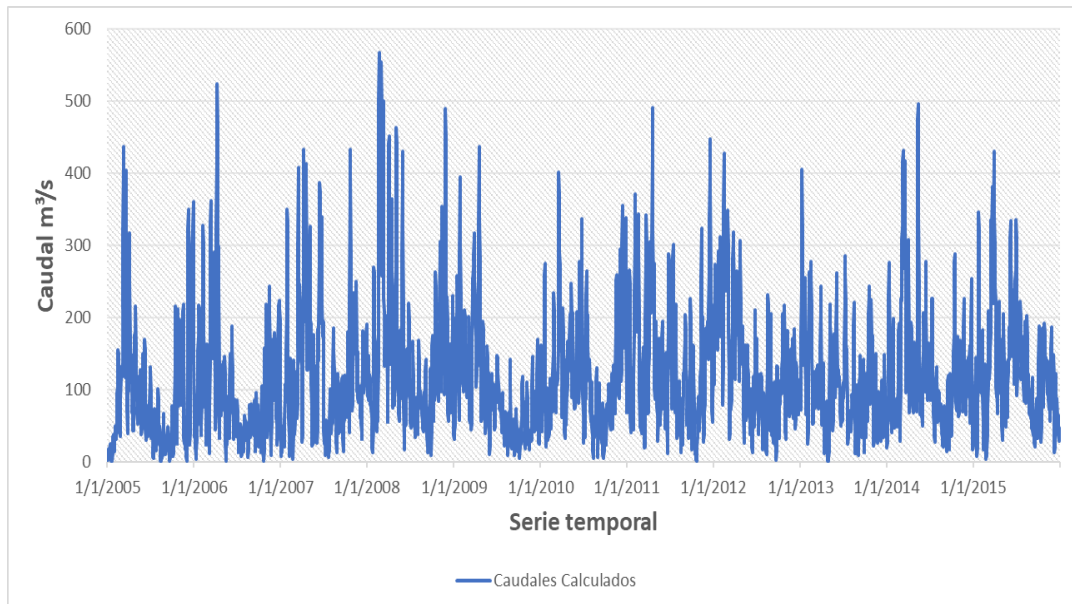


Figura. 33 Hidrograma resultante de caudales a la descarga del embalse Mazar.

Fuente: Elaboración propia

### **Capítulo 3: Análisis de La Gestión de la Operación de Embalses**

La operación del embalse se desarrolla según su propósito el cual genera restricciones en el almacenamiento y descargas de agua, es por esto que a lo largo del tiempo se han desarrollado modelos de simulación como el HEC-ResSim que permite predecir cómo se comporta un embalse para poder determinar la cantidad de agua que se descargará del mismo en un periodo de tiempo específico (Celi Contreras & Vélez Arcentales, 2013).

#### **3.1 Curvas de capacidad del embalse Mazar y Amaluza**

En la ingeniería de presas las curvas de capacidad se consideran un instrumento fundamental para el diseño de un embalse, debido a que posibilita la identificación del potencial del embalse, concretamente, analiza si el emplazamiento de la cerrada es adecuado para reservar la mayor cantidad de agua en el coste más reducido. Esta curva se determina a partir de la cota y el volumen o área del embalse.

Para este caso específico se empleó una batimetría para ajustar la curva de capacidad de agua del embalse y analizar su variabilidad con respecto a la curva precedente, esto se logra restando a la curva inicial el volumen sedimentado en su respectiva cota.

El propósito de la batimetría de un embalse es identificar las coordenadas (x, y, z) de la zona, así como en los levantamientos convencionales, no obstante, este método se diferencia por el sondeo en el cual se establece profundidad del nivel del agua con respecto a la superficie del fondo

##### **3.1.1 Curva de capacidad del embalse Amaluza**

Inicialmente se realizó 56 batimetrías de los 10 km de longitud del embalse, así pues, a través de la determinación de la profundidad de 30 perfiles transversales al embalse, distribuidos de la siguiente manera (Draga Amaluza I, 2013):

- Rio Paute: 24 perfiles
- Brazo del Palmira: 3 perfiles
- Brazo del Juvan: 3 perfiles

En base a las coordenadas obtenidas se definieron 5 ecuaciones para determinar los niveles y volúmenes, empleando los rangos siguientes (Draga Amaluzza I, 2013):

- Ecuación 3.1-V1:  $1991 \geq \text{cota} \leq 1985$
- Ecuación 3.2-V2:  $1984.99 \geq \text{cota} \leq 1975$
- Ecuación 3.3-V3:  $1974.99 \geq \text{cota} \leq 1960$
- Ecuación 3.4-V4:  $1959.99 \geq \text{cota} \leq 1945$
- Ecuación 3.5-V5:  $1944.99 \geq \text{cota} \leq 1930$

Las ecuaciones utilizadas para la determinación de la curva de capacidad son las siguientes (Draga Amaluzza I, 2013):

$$V1 = -0.0959 (Cota)^2 + 384.2289 (Cota) - 384774.9019967 \quad (3.1)$$

$$V2 = -0.01416 (Cota)^2 - 53.9996 (Cota) + 51447.5000002 \quad (3.2)$$

$$V3 = -0.001236 (Cota)^3 - 7.3057 (Cota)^2 - 14393.0066000154 (Cota) + 9451238.80701005 \quad (3.3)$$

$$V4 = -0.00015866667 (Cota)^3 - 0.918139999997 (Cota)^2 - 1771.24793332794(Cota) - 1139189.20899648 \quad (3.4)$$

$$V5 = -0.000669333333 (Cota)^3 - 3.88413999999(Cota)^2 - 7513.49436666504(Cota) - 4844883.34299895 \quad (3.5)$$

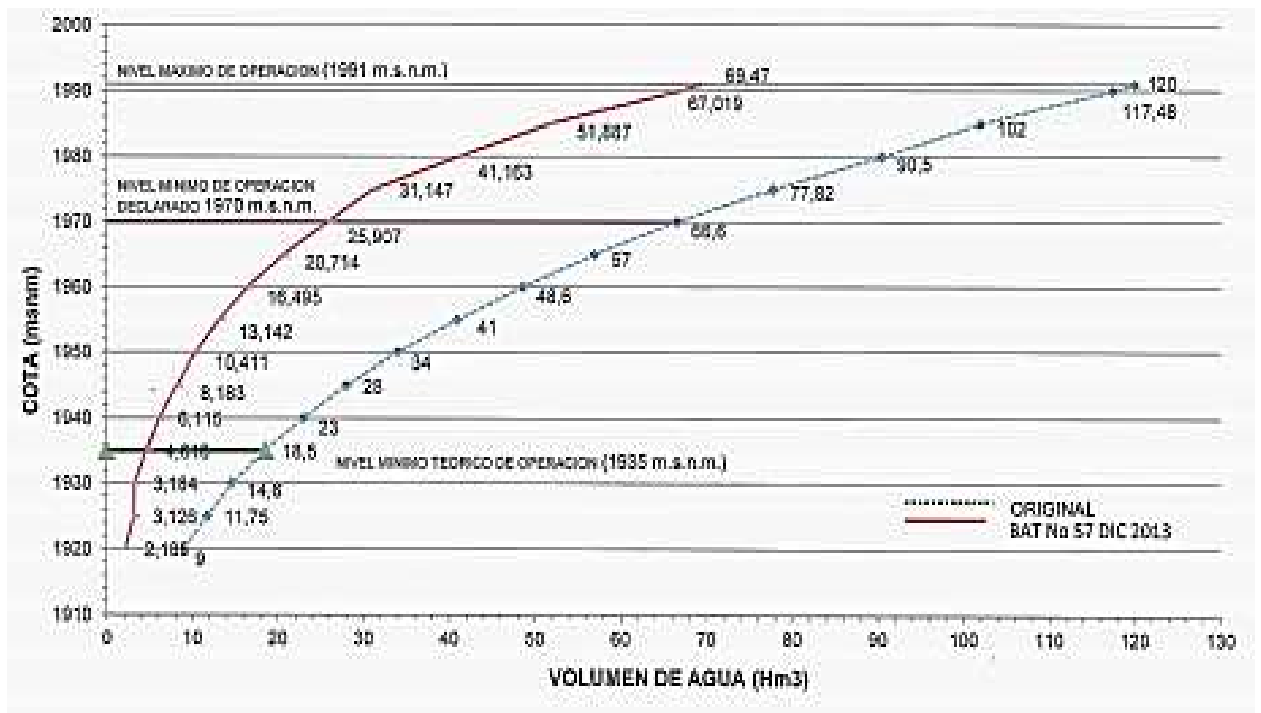
En donde:

V: Volumen de agua (Hm<sup>3</sup>)

Cota: Nivel del agua (m.s.n.m)

En todas las ecuaciones se tomo  $R^2 = 1$

Obteniendo así la siguiente curva de capacidad de la figura 34:



*Figura. 34. Curva de capacidad del embalse Amaluzá.*

*Fuente: (Draga Amaluzá I, 2013)*

Una vez realizada la construcción de la curva de capacidad del embalse Amaluzá como se observa en la figura 34 y su área estimada se expresan en la siguiente tabla 52.

*Tabla 52: Curva de capacidad Amaluza - Área estimada.*

<b>Curva de capacidad Amaluza</b>			
<b>Nivel (msnm)</b>	<b>Volumen (Hm3)</b>	<b>Volumen (m3)</b>	<b>Área Estimada (Ha)</b>
1930	3.181605285	11247094.79	9.107892649
1931	3.486737559	12224210.56	9.981386292
1932	3.778485831	13247646.32	10.81656593
1933	4.060866099	14316522.08	11.62492804
1934	4.337894361	15429957.83	12.41796912
1935	4.613586621	16587073.58	13.20718565
1936	4.891958879	17786989.33	14.00407415
1937	5.177027129	19028825.07	14.82013107
1938	5.472807379	20311700.81	15.66685294
1939	5.783315623	21634736.54	16.55573622
1940	6.112567864	22997052.27	17.49827742
1941	6.464580102	24397768	18.50597303
1942	6.843368333	25836003.72	19.59031952
1943	7.252948562	27310879.44	20.76281341
1944	7.697336787	28821515.15	22.03495118
1945	8.18545704	30367030.86	23.43227941
1946	8.596532831	32060763.08	24.6090546
1947	9.023920627	33803887.42	25.83252572
1948	9.468572425	35600131.77	27.10541801
1949	9.931440228	37447256.12	28.43045675
1950	10.41347604	39343020.47	29.8103672
1951	10.91563185	41285184.83	31.24787463
1952	11.43885966	43271509.2	32.74570429
1953	11.98411148	45299753.56	34.30658145
1954	12.5523393	47367677.93	35.93323138
1955	13.14449513	49473042.31	37.62837933
1956	13.76153096	51613606.69	39.39475058
1957	14.40439879	53787131.07	41.23507039
1958	15.07405063	55991375.46	43.15206402
1959	15.77143847	58224099.86	45.14845673
1960	16.49497987	60483064.25	47.21971849
1961	17.21636385	63056500	49.28480428
1962	18.00637184	65672750	51.54633809
1963	18.85758782	68328750	53.98309032
1964	19.7625958	71024500	56.57383142
1965	20.71397979	73752332.88	59.2973318
1966	21.70432377	76670327.93	62.13236188
1967	22.72621176	79628964.53	65.05769211
1968	23.77222774	82632637.41	68.05209286
1969	24.83495573	85685741.32	71.0943346
1970	25.90697971	88792671	74.16318774
1971	26.9808837	91957821.2	77.2374227

<b>(Continuación) Tabla 52. Curva de capacidad Amaluza</b>			
<b>Nivel (msnm)</b>	<b>Volumen (Hm3)</b>	<b>Volumen (m3)</b>	<b>Área Estimada (Ha)</b>
1972	28.04925168	95185586.65	80.29580992
1973	29.10466767	98480362.11	83.31711982
1974	30.13971565	101846542.3	86.28012278
1975	31.14700002	105288522	89.16364763
1976	33.09356002	108810696	94.73601061
1977	35.06844002	112417458.9	100.3894445
1978	37.07164002	116113205.5	106.1239492
1979	39.10316002	119902330.6	111.9395248
1980	41.16300002	123792392.7	117.8361713
1981	43.25116002	127667309	123.8138886
1982	45.36764002	131639338	129.8726769
1983	47.51244002	135707980.3	136.0125359
1984	49.68556002	139872736.4	142.2334659
1985	51.88700033	144133107	148.5354677
1986	55.29700033	148488592.7	158.2971795
1987	58.51520033	152938694	167.5098308
1988	61.54160033	157482911.5	176.1734216
1989	64.37620033	162120745.7	184.2879519
1990	67.01900033	166851697.4	191.8534217
1991	69.47000033	171675267	198.869831

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.1.2 Curva de capacidad del embalse Mazar

Inicialmente se levantó 30 km de longitud del embalse, así pues, a través de la determinación de la profundidad de 36 perfiles transversales al embalse, distribuidos de la siguiente manera (Draga Amaluza, 2013):

- Río Collay: 24 perfiles

En base a las coordenadas obtenidas se definieron 4 ecuaciones para determinar los niveles y volúmenes, empleando los rangos siguientes:

- Ecuación 3.6-V1:  $2153 \geq \text{cota} \leq 2140$
- Ecuación 3.7-V2:  $2139.99 \geq \text{cota} \leq 2125$
- Ecuación 3.8-V3:  $2124.99 \geq \text{cota} \leq 2110$

- Ecuación 3.9-V4:  $2109.99 \geq \text{cota} \leq 2095$

Las ecuaciones utilizadas para la determinación de la curva de capacidad son las siguientes (Draga Amaluz, 2013):

$$V1 = -0.002797344744 (Cota)^3 + 18.065007664872(Cota)^2 - 38879.269159308(Cota) + 27886350.4984966 \quad (3.6)$$

$$V2 = -0.05829804 (Cota)^2 - 242.573932920017 (Cota) + 251409.408102918 \quad (3.7)$$

$$V3 = -0.000083236 (Cota)^3 - 0.575689940034 (Cota)^2 - 1313.86036667247(Cota) + 991253.224762231 \quad (3.8)$$

$$V4 = -0.000732457333 (Cota)^3 - 4.585370939988 (Cota)^2 - 9571.28273984106(Cota) - 6661406.47656115 \quad (3.9)$$

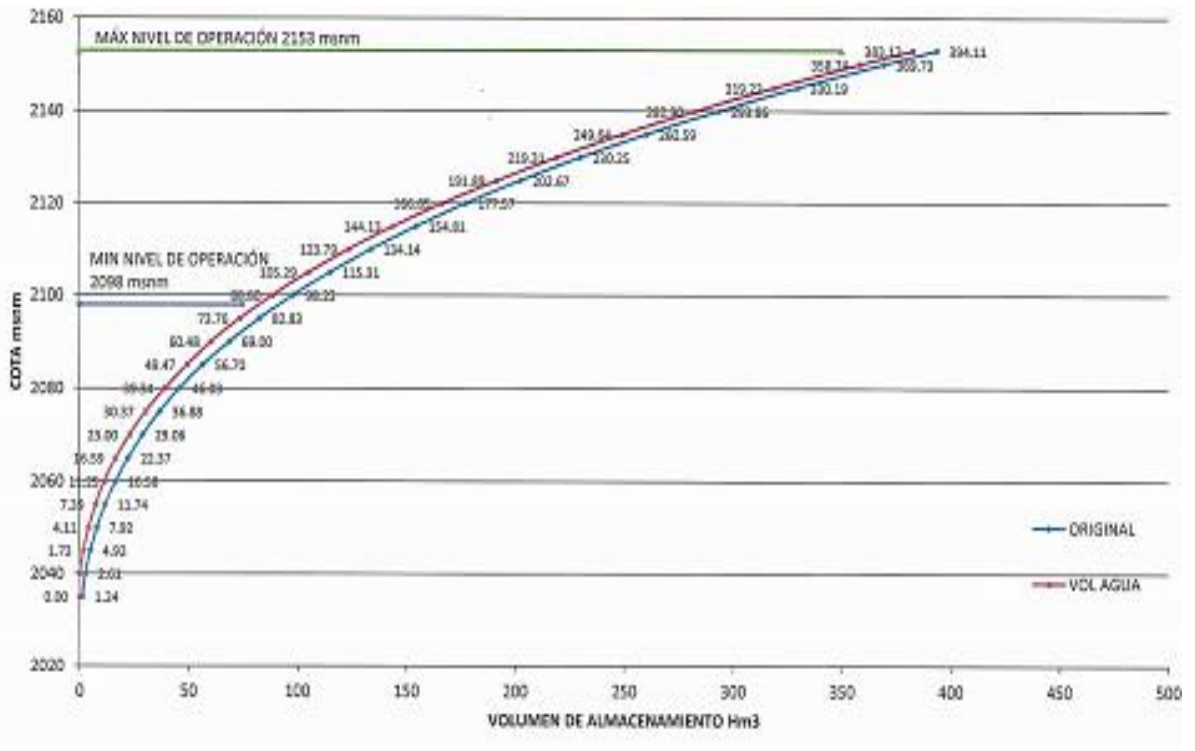
En donde:

V: Volumen de agua (Hm<sup>3</sup>)

Cota: Nivel del agua (m.s.n.m)

En todas las ecuaciones se tomo  $R^2 = 1$

Obteniendo así la siguiente curva de capacidad de la figura 35:



**Figura. 35. Curva de capacidad del embalse Mazar.**

*Fuente: (Draga Amaluz, 2013)*

Una vez realizada la construcción de la curva de capacidad del embalse Mazar como se aprecia en la figura 35 y su área estimada se expresan en la siguiente tabla 53.

**Tabla 53: Curva de capacidad - Área estimada de Mazar**

<b>Curva de capacidad Mazar</b>			
<b>Nivel (msnm)</b>	<b>Volumen (Hm3)</b>	<b>Volumen (m3)</b>	<b>Área Estimada (Ha)</b>
2060	11.24709479	11247094.79	14.55091209
2061	12.22421056	12224210.56	15.81505415
2062	13.24764632	13247646.32	17.13912264
2063	14.31652208	14316522.08	18.52197906
2064	15.42995783	15429957.83	19.96248491
2065	16.58707358	16587073.58	21.45950168
2066	17.78698933	17786989.33	23.01189088
2067	19.02882507	19028825.07	24.61851402
2068	20.31170081	20311700.81	26.27823259
2069	21.6347365z4	21634736.54	27.9899081
2070	22.99705227	22997052.27	29.75240204
2071	24.397768	24397768	31.56457592

<b>(Continuación) Tabla 53. Curva de capacidad - Área estimada de Mazar.</b>			
<b>Nivel (msnm)</b>	<b>Volumen (Hm3)</b>	<b>Volumen (m3)</b>	<b>Área Estimada (Ha)</b>
2072	25.83600372	25836003.72	33.42529123
2073	27.31087944	27310879.44	35.33340949
2074	28.82151515	28821515.15	37.28779219
2075	30.36703086	30367030.86	39.28730083
2076	32.06076308	32060763.08	41.47856436
2077	33.80388742	33803887.42	43.73372888
2078	35.60013177	35600131.77	46.05761732
2079	37.44725612	37447256.12	48.44733169
2080	39.34302047	39343020.47	50.89997399
2081	41.28518483	41285184.83	53.41264623
2082	43.2715092	43271509.2	55.98245041
2083	45.29975356	45299753.56	58.60648853
2084	47.36767793	47367677.93	61.2818626
2085	49.47304231	49473042.31	64.00567462
2086	51.61360669	51613606.69	66.77502659
2087	53.78713107	53787131.07	69.58702051
2088	55.99137546	55991375.46	72.4387584
2089	58.22409986	58224099.86	75.32734225
2090	60.48306425	60483064.25	78.24987406
2091	63.0565	63056500	81.57925272
2092	65.67275	65672750	84.96402225
2093	68.32875	68328750	88.40021829
2094	71.0245	71024500	91.88784083
2095	73.75233288	73752332.88	95.41697053
2096	76.67032793	76670327.93	99.19212227
2097	79.62896453	79628964.53	103.019854
2098	82.63263741	82632637.41	106.9058513
2099	85.68574132	85685741.32	110.8557999
2100	88.792671	88792671	114.8753855
2101	91.9578212	91957821.2	118.9702939
2102	95.18558665	95185586.65	123.1462106
2103	98.48036211	98480362.11	127.4088214
2104	101.8465423	101846542.3	131.763812
2105	105.288522	105288522	136.2168681
2106	108.810696	108810696	140.7736754
2107	112.4174589	112417458.9	145.4399196
2108	116.1132055	116113205.5	150.2212863
2109	119.9023306	119902330.6	155.1234612
2110	123.7923927	123792392.7	160.1562232
2111	127.667309	127667309	165.1693904
2112	131.639338	131639338	170.308197
2113	135.7079803	135707980.3	175.5719968
2114	139.8727364	139872736.4	180.9601439
2115	144.133107	144133107	186.471992

<b>(Continuación) Tabla 53. Curva de capacidad - Área estimada de Mazar.</b>			
<b>Nivel (msnm)</b>	<b>Volumen (Hm3)</b>	<b>Volumen (m3)</b>	<b>Área Estimada (Ha)</b>
2116	148.4885927	148488592.7	192.1068951
2117	152.938694	152938694	197.864207
2118	157.4829115	157482911.5	203.7432816
2119	162.1207457	162120745.7	209.7434727
2120	166.8516974	166851697.4	215.8641344
2121	171.675267	171675267	222.1046204
2122	176.5909552	176590955.2	228.4642846
2123	181.5982625	181598262.5	234.9424809
2124	186.6966895	186696689.5	241.5385632
2125	191.8875229	191887522.9	248.2541962
2126	197.138558	197138558	255.047715
2127	202.5061892	202506189.2	261.9920799
2128	207.9904165	207990416.5	269.0872908
2129	213.5912398	213591239.8	276.3333476
2130	219.3086593	219308659.3	283.7302505
2131	225.1426748	225142674.8	291.2779993
2132	231.0932864	231093286.4	298.9765942
2133	237.1604941	237160494.1	306.8260351
2134	243.3442978	243344297.8	314.826322
2135	249.6446977	249644697.7	322.9774549
2136	256.0616936	256061693.6	331.2794337
2137	262.5952856	262595285.6	339.7322586
2138	269.2454737	269245473.7	348.3359295
2139	276.0122578	276012257.8	357.0904464
2140	282.8932606	282893260.6	365.9927334
2141	289.8002285	289800228.5	374.9286129
2142	296.9025211	296902521.1	384.1171934
2143	304.1833545	304183354.5	393.5367607
2144	311.6259444	311625944.4	403.1656003
2145	319.213507	319213507	412.981998
2146	326.9292579	326929257.9	422.9642393
2147	334.7564133	334756413.3	433.0906099
2148	342.678189	342678189	443.3393954
2149	350.677801	350677801	453.6888814
2150	358.7384652	358738465.2	464.1173537
2151	366.8433975	366843397.5	474.6030978
2152	374.9758139	374975813.9	485.1243993
2153	383.1189303	383118930.3	495.659544
2154	392.3604507	392360450.7	507.6157473
2155	401.8068161	401806816.1	519.8369684
2156	411.3189163	411318916.3	532.1432338
2157	420.8042526	420804252.6	544.4148735
2158	430.2174759	430217475.9	556.593217
2159	439.5608292	439560829.2	568.6811664
2160	448.8836899	448883689.9	580.7426035

<b>(Continuación) Tabla 53. Curva de capacidad - Área estimada de Mazar.</b>			
<b>Nivel (msnm)</b>	<b>Volumen (Hm3)</b>	<b>Volumen (m3)</b>	<b>Área Estimada (Ha)</b>
2161	458.2826614	458282661.4	592.9025089
2162	467.9018936	467901893.6	605.3473762
2163	477.9326859	477932685.9	618.3246987
2164	488.6137619	488613761.9	632.1433249
2165	500.2310715	500231071.5	647.1732018

Fuente: Elaboración propia

### **3.2 Aplicación de software HEC-ResSim para los embalses Mazar y Amaluza.**

El software HEC Reservoir System Simulation (HEC-ResSim) desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU, es una herramienta de apoyo que facilita la modelación de embalses, siendo de gran importancia al momento toma de decisiones en las sus diferentes fases (planificación, gestión y funcionamiento), ya que presenta un sistema manejable para representar la operación de los embalses. Para realizar estos modelos el Hec-ResSim posee tres módulos para disponer de la información de los directorios y datos específicos que son:

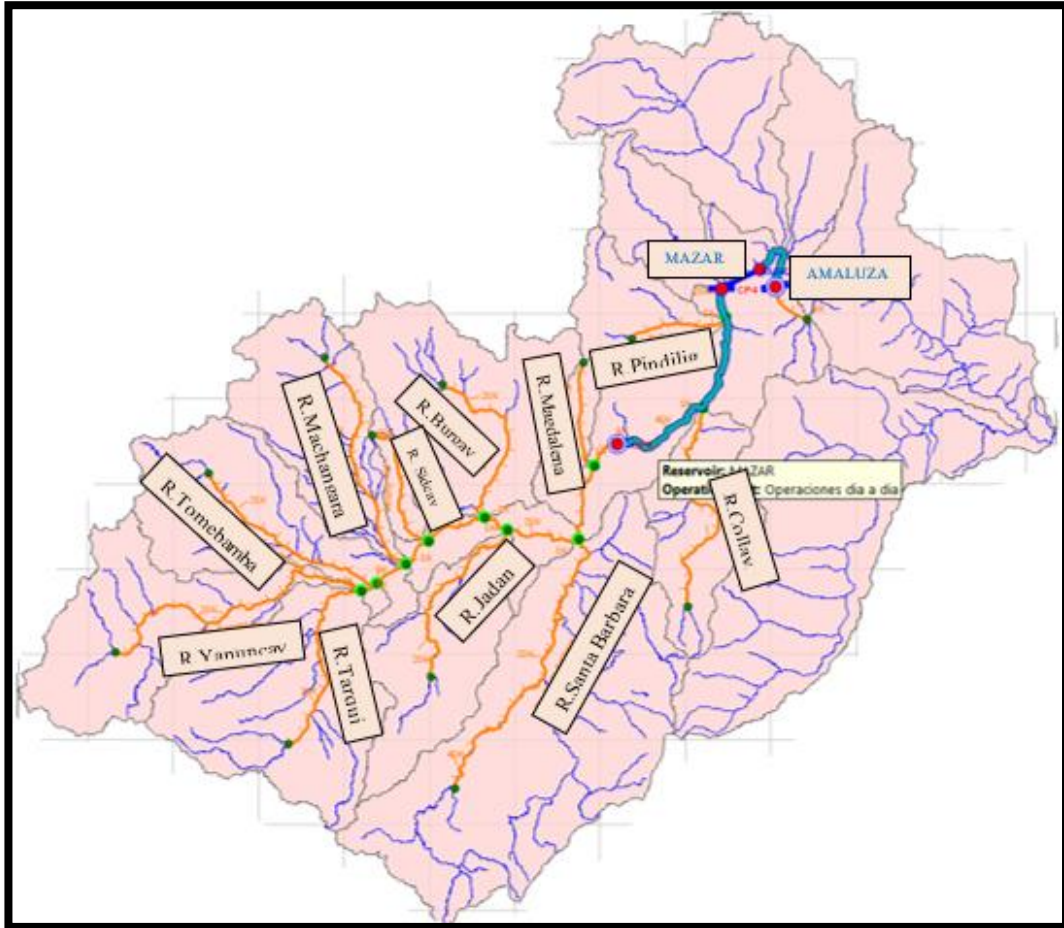
#### **3.2.1 Watershed setup o módulo de configuración de cuenca**

Para crear el modelo de la cuenca se llevó a cabo el siguiente proceso:

- ✓ Inicialmente para la delimitación de la cuenca de estudio se fijan los escritorios añadiendo la información del área de estudio de las cuencas y subcuencas, así como las redes hídricas en formato shape, para después crear el archivo. Es fundamental establecer la zona horaria en “Displat Coordinate Information”.
- ✓ Posteriormente para representar el sistema de ríos (rio principal y confluencias), con la herramienta “stream alignment tool” se crea la corriente de alineación de aguas arriba hacia aguas abajo.
- ✓ Se añade los reservorios de igual manera.



datos generados en el módulo anterior, y trazar los enlaces de enrutamiento de cada reservorio en “Reach tool”, ajustándolo a la alineación de la corriente como se aprecia en la ilustración 21.

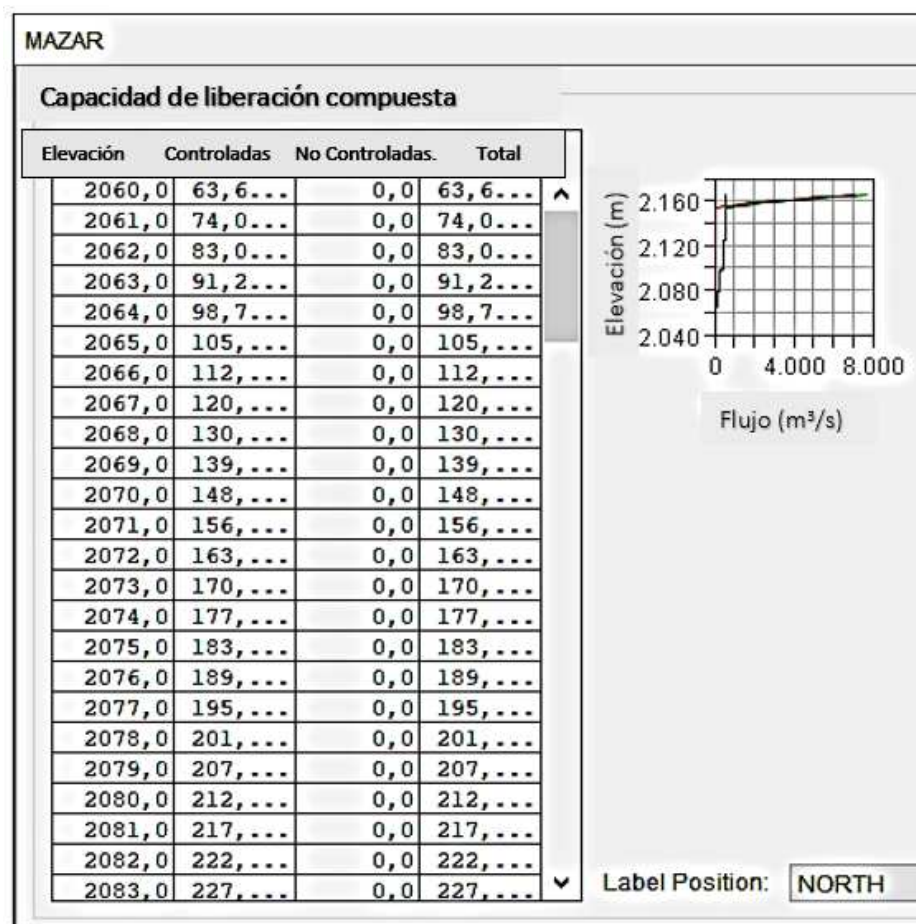


*Ilustración 21. Módulo Reservoir Network de Mazar.*

*Fuente: HEC-ResSim*

- ✓ A continuación, es necesario en “Local Flow” agregar un factor que determine si el hidrograma tiende a acrecentar o disminuir en cada punto de los reservorios es por ellos que se le coloco el valor de 1 ya que esto indica que el hidrograma se va mantener normal.

- ✓ Para concluir este componente, se requiere definir en el cuadro de dialogo los parámetros de reservorio y presa. En el primer parámetro se genera una gráfica en función de la asignación de un área de almacenamiento y elevación para cada reservorio (Figura 29), por otro lado, en el parámetro de presa se identifica las salidas controladas conforme a la altura de la presa y se representan por medio de compuertas a diferentes elevaciones y capacidades máximas, y salidas no controladas (vertederos de exceso de la represa) con datos de elevación y un flujo de salida como se observa en la figura 36.

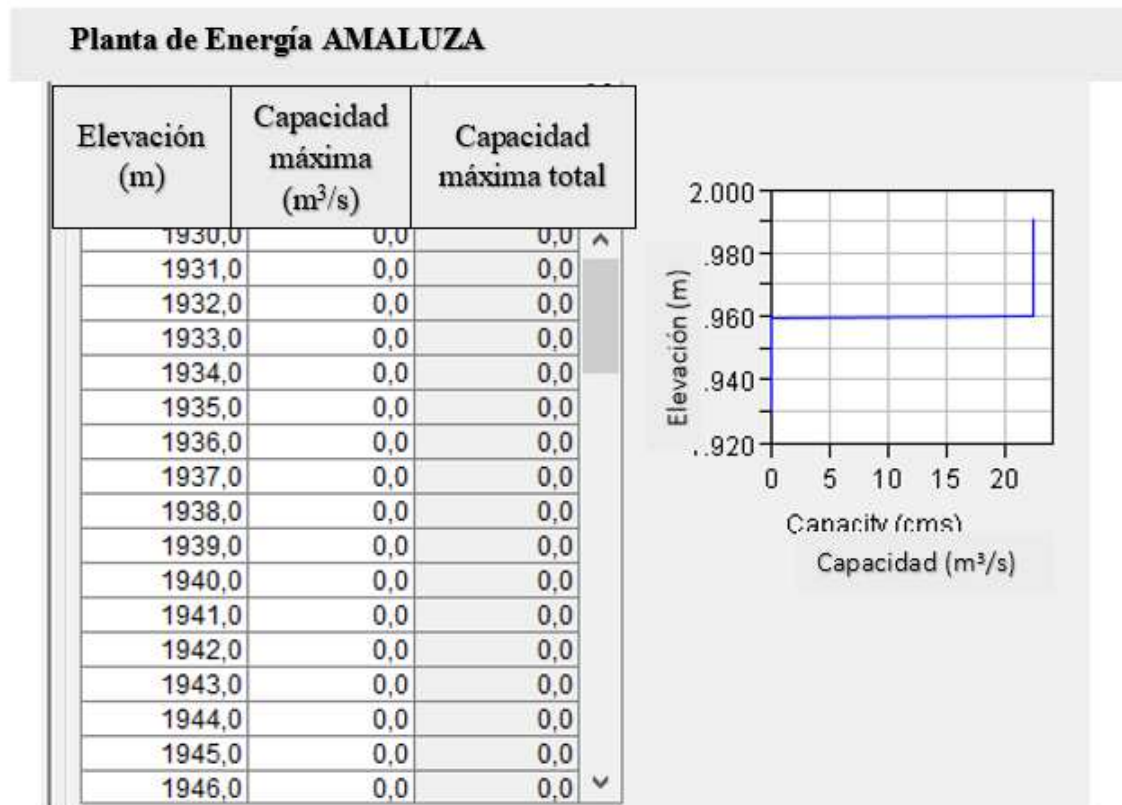


*Figura. 36. Parámetros del Reservorio Mazar.*

*Fuente: Hec-ResSim*

En la figura 36 se muestra un cuadro resumen del ingreso de datos en el programa Hec ResSim en donde se ingresan datos como las elevaciones, salidas controladas las cuales son

salidas medibles como compuertas de liberación de caudal, así como también se ingresan datos de salidas no controladas que en este caso son los vertederos de excesos y son salidas no medibles, formándose así una curva que está en función del caudal y la elevación.



*Figura. 37. Parámetro de reservorio de Amaluza.*

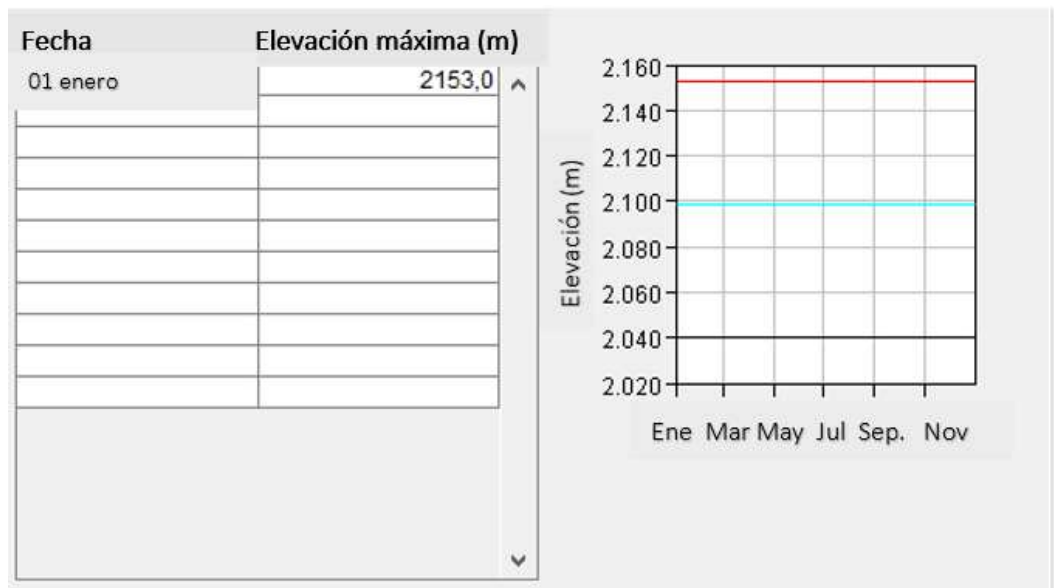
*Fuente: Hec-ResSim*

En cuanto a la figura 37 se da el mismo caso en donde se muestra los datos de ingreso en el programa de simulación pero en este caso se muestra el ingreso de datos de la planta de generación en donde se introducen parámetros de elevación, capacidad máxima y capacidad máxima total.

### 3.2.4 Componentes de operación

- ✓ En base los componentes de operación es posible desarrollar un plan de regulación o aplicar un esquema que permita la toma de decisiones dependiendo de la cantidad de

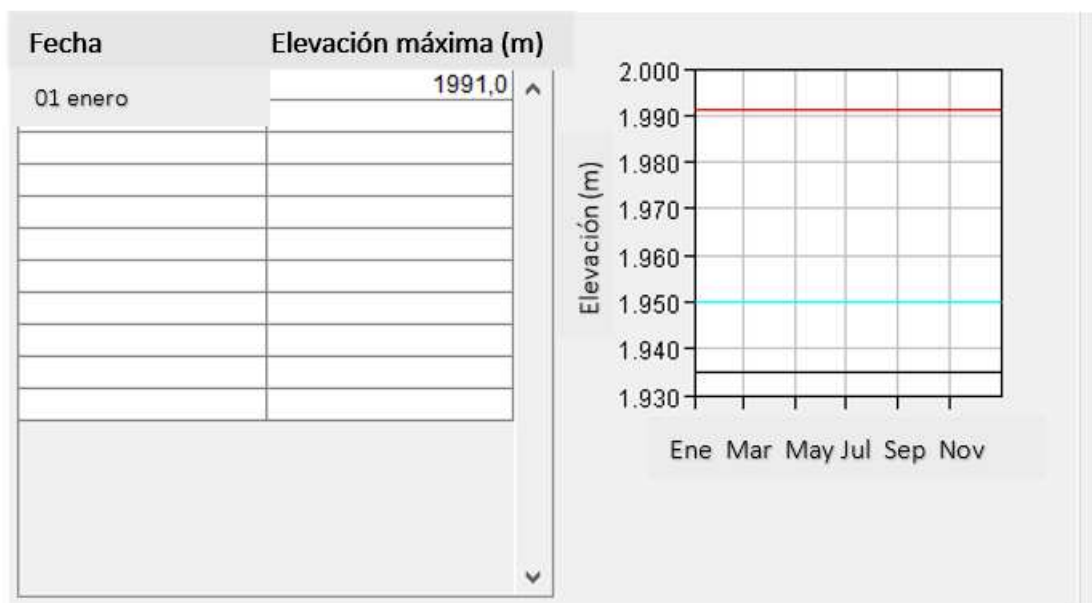
agua liberada en función del tiempo, para ello se requiere establecer reglas de operación, en el software se crean automáticamente tres zonas o reglas por defecto que son “Flood Control”, “Conservation”, “Inactive”, en cada una de estas se definió el nivel máximo de operación, nivel mínimo de operación y nivel de sedimentos respectivamente como se aprecia en las figuras 38 y 39.



**Figura. 38. Reglas de operación de Mazar.**

**Fuente: Hec-ResSim**

En la presente figura 38 se muestra el ingreso de datos de las reglas de operación en donde se muestra en este caso la elevación máxima que es 2153m y es representado en el grafico por una línea roja.



*Figura. 39. Reglas de operación de Amaluza.*

*Fuente: Hec-ResSim*

En la figura 39 se tiene el valor de elevación máxima que hace referencia a las reglas de operación en el embalse Amaluza que es el valor de 1991m y de igual manera como en la figura 39 se ve representada con una línea roja.

- ✓ A continuación, se debe fijar un control de ejecución para la simulación, esto se logra definiendo una alternativa a través de la herramienta “Alternative”, la cual será utilizada para la simulación.
- ✓ Después de establecida la alternativa en este cuadro de dialogo se presentan las siguientes pestañas:

“run control”: Se define el paso del tiempo

“operations”: Se especifica las reglas de operación para cada embalse.

“lookback”: Se indican las condiciones iniciales (elevaciones y flujos)

“times series”: Se identifican los datos de series de tiempo en cada punto de ubicación de la red de embalse, es posible obtener estos datos a partir de los datos de caudales de una simulación ejecutada en el software HEC-HMS como se observa en la figura 40, asignando una determinada estación en la red de embalse como se aprecia en la figura 41.

Ubicación	Variable	Tipo	Valor por defecto
Reserv.Amaluza	Elevacion	Constante	1991,0
Reserv.Amaluza	Almacenamiento	Calculado	
Amaluza No/c	Vertedero	Constante	0,0
Amaluz. P de G	Descarga	Constante	1991,0
Reserv. Mazar	Elevacion	Constante	2153,0
Reserv. Mazar	Almacenamiento	Calculado	
Mazar. P de Ge	Descarga	Constante	2153,0
Mazar No/contr	Vertedero	Constante	0,0
Mazar/Controlad	Descarga	Constante	0,0

*Figura. 40. Alternativa Lookback.*

*Fuente: Hec-ResSim*

Pathnames Shown: 2785 Pathnames Selected: 0 Pathnames in File: 2785 File Size: 16,49 MB

Search A:  C:  E:

By Parts: B:  D:  F:

Number	Part A	Part B	Part C	Part D	Part E	Part F
1		A	FLOW	01JAN2004	1DAY	RUN:RUN 1
2		A	FLOW	01JAN2005	1DAY	RUN:RUN 1
3		A	FLOW	01JAN2006	1DAY	RUN:RUN 1
4		A	FLOW	01JAN2007	1DAY	RUN:RUN 1
5		A	FLOW	01JAN2008	1DAY	RUN:RUN 1
6		A	FLOW	01JAN2009	1DAY	RUN:RUN 1
7		A	FLOW	01JAN2010	1DAY	RUN:RUN 1
8		A	FLOW	01JAN2011	1DAY	RUN:RUN 1
9		A	FLOW	01JAN2012	1DAY	RUN:RUN 1
10		A	FLOW	01JAN2013	1DAY	RUN:RUN 1
11		A	FLOW	01JAN2014	1DAY	RUN:RUN 1
12		A	FLOW	01JAN2015	1DAY	RUN:RUN 1
13		A	FLOW-COMBINE	01JAN2004	1DAY	RUN:RUN 1
14		A	FLOW-COMBINE	01JAN2005	1DAY	RUN:RUN 1
15		A	FLOW-COMBINE	01JAN2006	1DAY	RUN:RUN 1
16		A	FLOW-COMBINE	01JAN2007	1DAY	RUN:RUN 1
17		A	FLOW-COMBINE	01JAN2008	1DAY	RUN:RUN 1
18		A	FLOW-COMBINE	01JAN2009	1DAY	RUN:RUN 1
19		A	FLOW-COMBINE	01JAN2010	1DAY	RUN:RUN 1
20		A	FLOW-COMBINE	01JAN2011	1DAY	RUN:RUN 1
21		A	FLOW-COMBINE	01JAN2012	1DAY	RUN:RUN 1
22		A	FLOW-COMBINE	01JAN2013	1DAY	RUN:RUN 1
23		A	FLOW-COMBINE	01JAN2014	1DAY	RUN:RUN 1
24		A	FLOW-COMBINE	01JAN2015	1DAY	RUN:RUN 1
25		B1	FLOW	01JAN2004	1DAY	RUN:RUN 1
26		B1	FLOW	01JAN2005	1DAY	RUN:RUN 1
27		B1	FLOW	01JAN2006	1DAY	RUN:RUN 1
28		B1	FLOW	01JAN2007	1DAY	RUN:RUN 1
29		B1	FLOW	01JAN2008	1DAY	RUN:RUN 1
30		B1	FLOW	01JAN2009	1DAY	RUN:RUN 1
31		B1	FLOW	01JAN2010	1DAY	RUN:RUN 1

*Figura. 41. Datos DSS de simulación del HEC-HMS.*

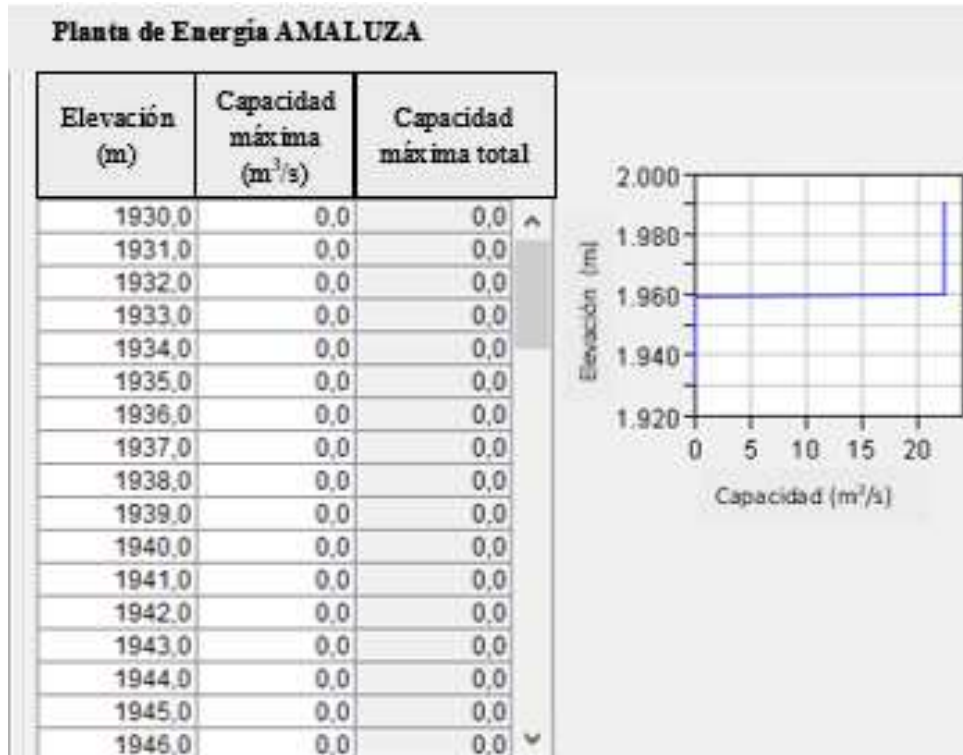
*Fuente: Hec-ResSim*

En la presente figura 41 se presenta la ventana de en donde se insertan los datos calculados en el Software HEC-HMS en formato DSS que ayudara en la posterior simulación de los embalses llevados a cabo en el software Hec-ResSim.

### 3.2.5 Simulación

- ✓ En el presente trabajo se realizará la simulación de una planta hidroeléctrica, para lo que se utilizó la herramienta “add power plant” como se observa en la figura 42 y 43 para incluirla, a continuación para determinar la energía, capacidad y elevación necesaria

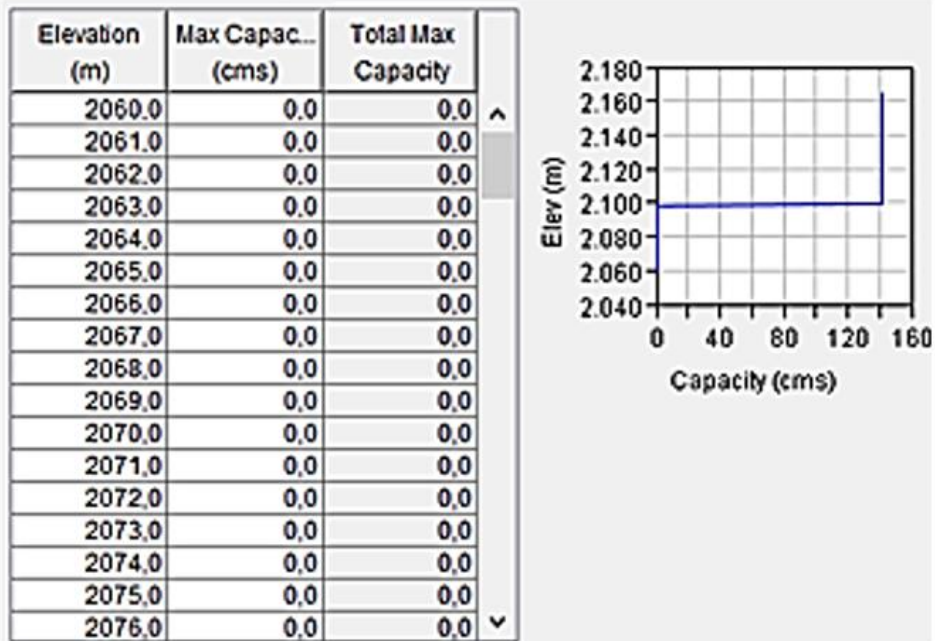
para la planta se agrega las respectivas composiciones, después se establece la capacidad de energía en MW para que no se sobrepase, y por último se identifica el rendimiento de la planta, el cual dependerá de la turbina, el generador y las pérdidas asociadas a la planta de energía.



*Figura. 42 Planta de energía de Mazar y Amaluza.*

*Fuente: HEC-ResSim*

### Planta de Energía MAZAR



*Figura. 43 Capacidad de energía de Mazar y Amaluza.*

*Fuente: HEC-ResSim*

- ✓ Una vez definido el esquema geométrico, la red de flujo, los componentes físicos del embalse, las reglas de operación, las alternativas y la planta hidroeléctrica se procede a ejecutar la simulación que se lo realizó a partir de 4 de marzo del 2014 hasta el 5 de marzo del 2015. En el apartado siguiente se puede observar los resultados de la energía que produce la planta dependiendo del almacenamiento, confirmando que esta no sobrepase la capacidad máxima definida.

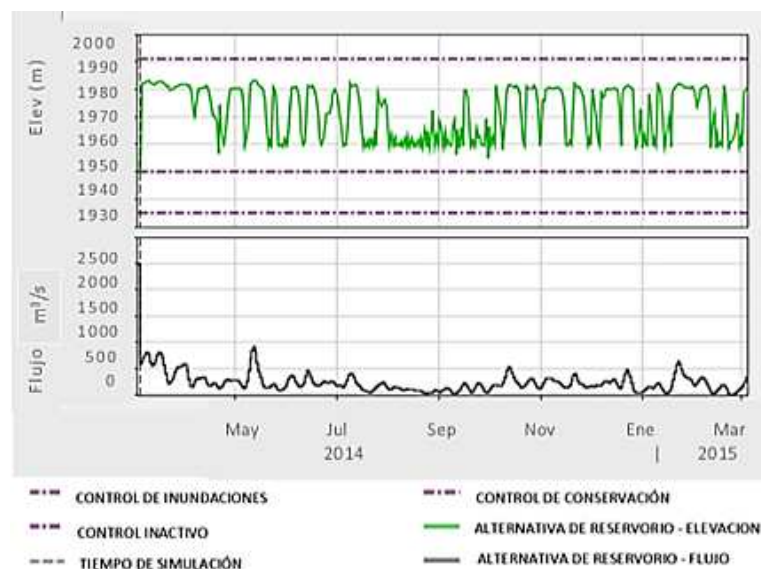
### **3.3 Relación de la gestión de operación de los embalses Mazar y Amaluza para la optimización de generación hidroeléctrica**

Para la relación de la gestión se empleó un programa computacional, donde las variables fijadas son las estipuladas para la operación óptima de los embalses para brindar una buena generación hidroeléctrica. La optimización de las plantas hidroeléctricas es un campo de gran importancia ya que su beneficio es de carácter social, económico y ambiental.

Dicha optimización se la puede abordar desde diferentes puntos de vista, pero el que se empleara mediante las reglas de operación de máximo y mínimo niveles recomendados, para que de esta manera se observe su comportamiento. Cabe aclarar que la relación de la gestión de operación del embalse Mazar y Amaluza se lo simulo en dos escenarios, cuando el embalse se encuentra con su nivel máximo de operación y nivel mínimo, con la finalidad de observar su aporte a la generación eléctrica del país.

### 3.3.1 Generación eléctrica con el mínimo de operación del embalse Amaluza y Mazar

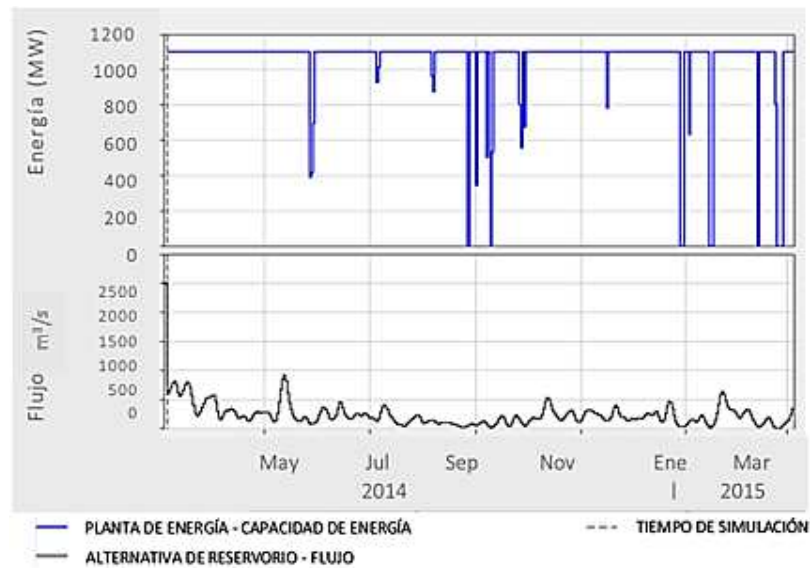
Inicialmente se ejecutó el modelo con los niveles mínimos de operación. En la figura 44 se observa la correlación existente entre el nivel diario de operación de la represa Amaluza y el caudal diario, donde es posible apreciar que dicho nivel fluctúa entre los rangos de operación máximo y mínimo, es decir se dispondrá de una generación eléctrica satisfactoria.



**Figura. 44 Nivel diario del embalse Amaluza con el mínimo de operación**

**Fuente: HEC-ResSim**

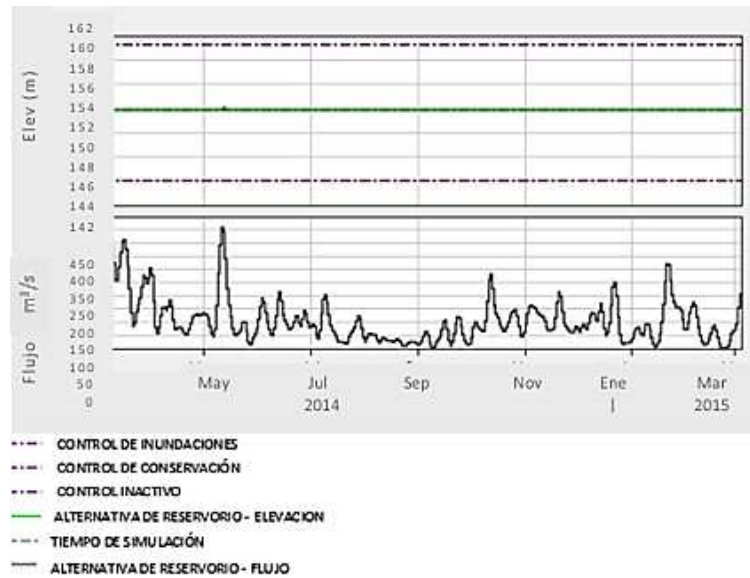
En la figura 45 se observa la generación en función de los niveles de operación diaria del embalse Amaluza, en la cual no se observa una variación abrupta, sin embargo, en ciertas épocas de año no existe generación eléctrica, por lo cual decae hasta cero.



**Figura. 45** Generación eléctrica resultado del nivel diario del embalse Amaluza

**Fuente:** Hec-ResSim

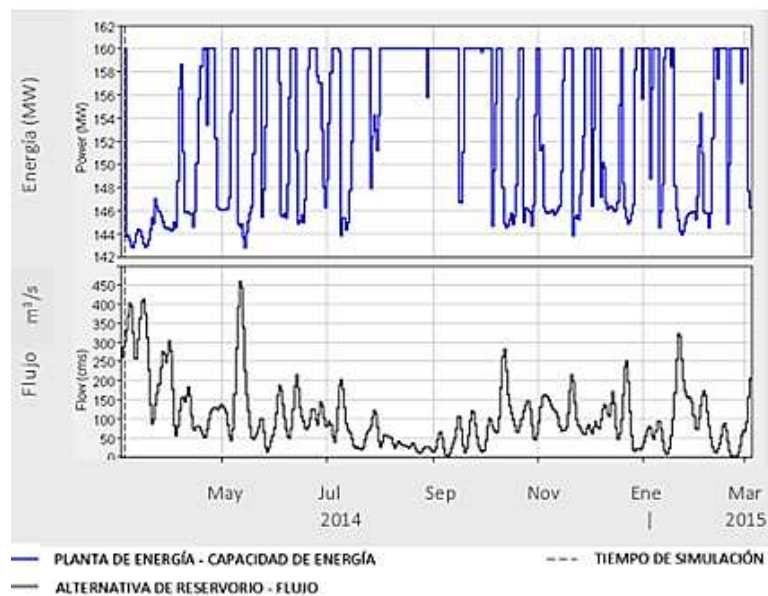
De la misma manera, en la figura 46 se presentan los niveles diarios de operación del embalse Mazar, el cual se encuentra en el mínimo técnico recomendado, por consiguiente, la represa sigue produciendo energía de manera adecuada.



**Figura. 46** Comportamiento del embalse Mazar con su nivel mínimo de operación.

*Fuente: HEC-ResSim*

En la figura 47 se indica la generación eléctrica del embalse Mazar con su nivel mínimo de operación.

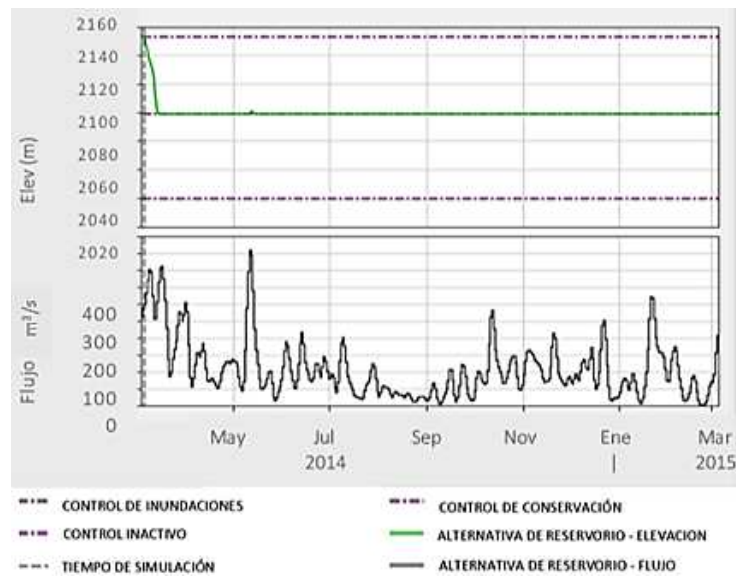


**Figura. 47** Generación eléctrica resultado del nivel diario del embalse Mazar.

*Fuente: HEC-ResSim*

### 3.3.2 Generación eléctrica con el máximo de operación del embalse Amaluza y Mazar

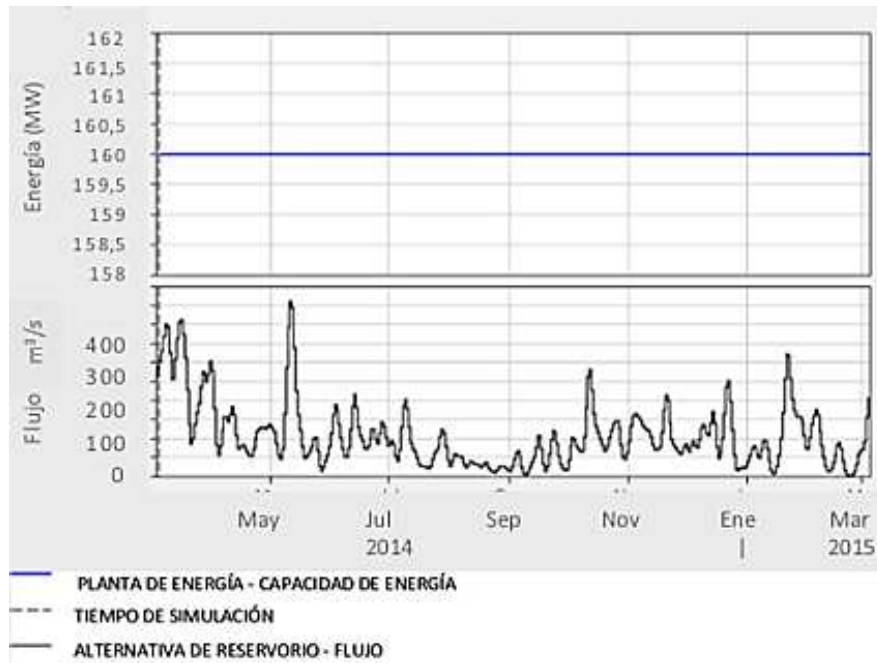
Posteriormente se ejecutó el modelo con los niveles máximos de operación. En la figura 48 se observa la relación entre el nivel diario de operación de la represa Mazar y el caudal diario, de la cual se puede deducir que el embalse tiene la capacidad de trabajar con el nivel mínimo de operación debido al gran volumen de agua que este almacena.



*Figura. 48 Niveles de operación diarios con su máximo de operación*

*Fuente: HEC-ResSim*

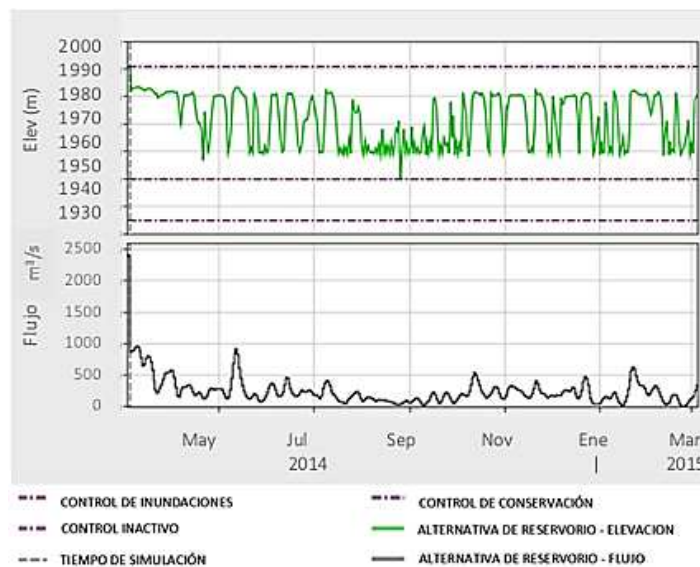
De la misma manera se presenta en la figura 49, que con el máximo nivel de operación la represa genera su máxima capacidad instalada.



*Figura. 49 Generación eléctrica del embalse Mazar con su máximo nivel de operación*

*Fuente: HEC-ResSim*

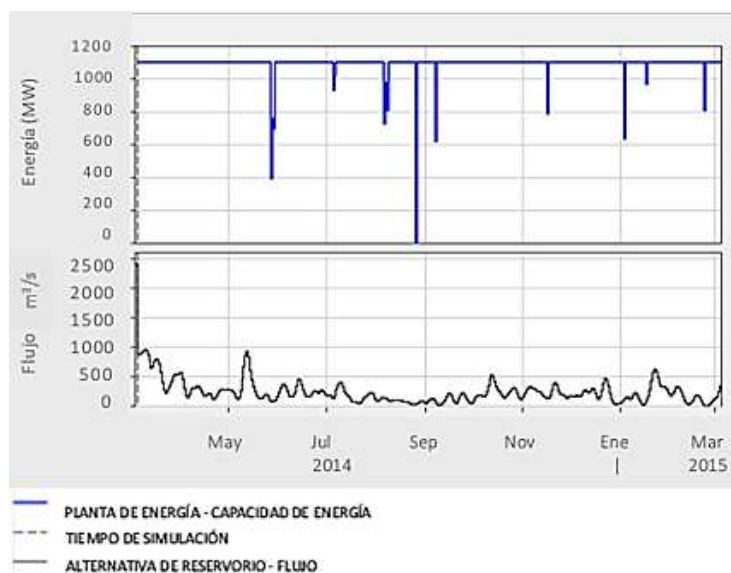
Ademas en el embalse Amaluza con su nivel maximo de operación, se puede señalar que de este sigue fluctuando entre los rangos maximo y minimo de operación.



*Figura. 50 Niveles de operación diarios del embalse Amaluza con su máximo de operación*

*Fuente: HEC-ResSim*

En la figura 51 se observa que el embalse trabaja con su máxima capacidad, no obstante, en cierta época del año su generación es nula.

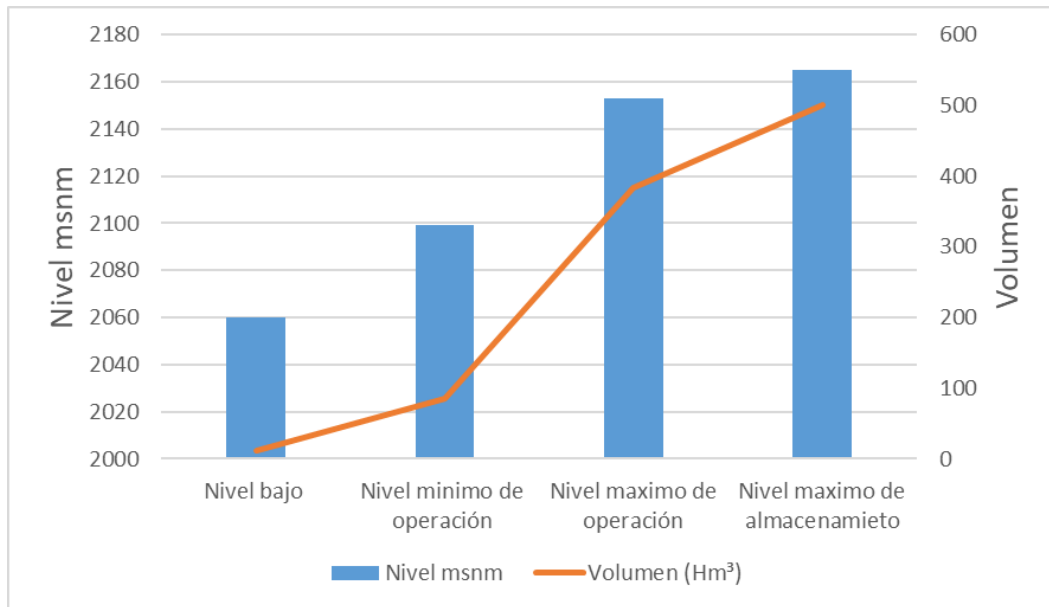


*Figura. 51. Embalse Amaluza con su nivel máximo de operación.*

*Fuente: Elaboración propia*

### **3.3.3 Relación de Nivel – Volumen – Generación de los embalses Mazar y Amaluza**

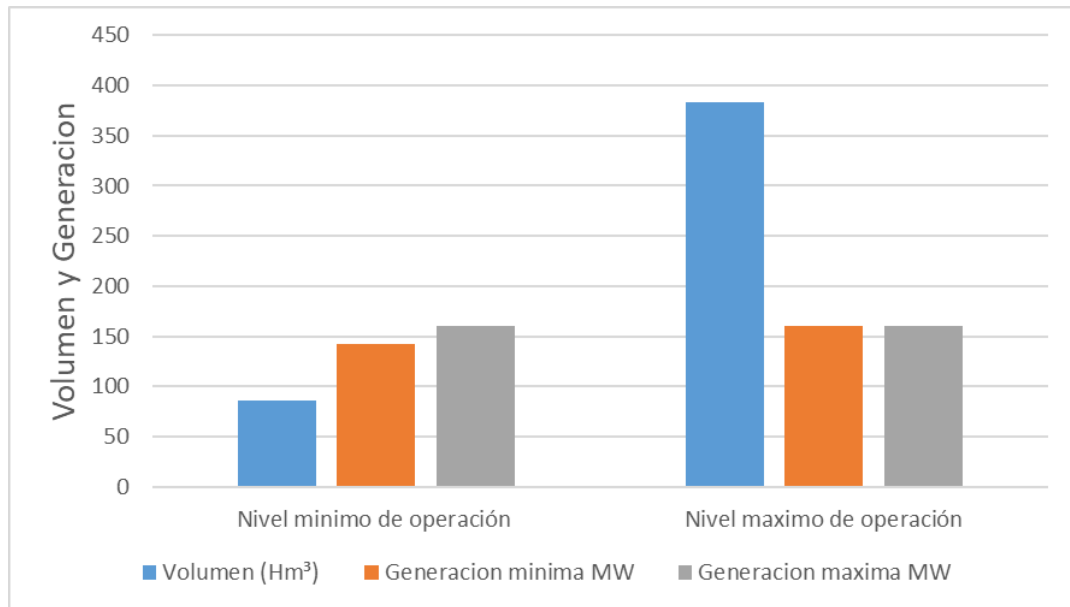
En la figura 52 se puede observar que el nivel bajo de 1930 dispone de un volumen de 11.247, en cambio el nivel mínimo de operación de diseño de 2099 m.s.n.m. cuenta con un volumen de 85.686 Hm<sup>3</sup>, mientras que el nivel mínimo de operación recomendado de 2153 m.s.n.m. posee un volumen de 383.119 Hm<sup>3</sup> y por último el nivel máximo de operación de 2165 m.s.n.m. dispone de un volumen de 500.231 Hm<sup>3</sup>.



**Figura. 52 Nivel VS Volumen del embalse Mazar**

*Fuente: Elaboración propia*

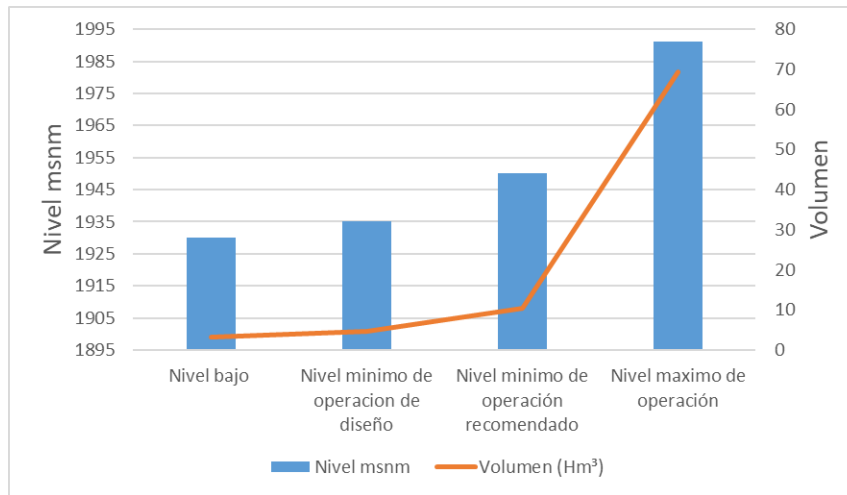
Por otro lado, la figura 53 indica que el nivel mínimo de operación posee un volumen de 85.686 Hm<sup>3</sup>, el cual produce una generación mínima de 142 MW y una generación máxima de 160 MW. Por el contrario, el nivel máximo de operación dispone de un volumen de 383.119 Hm<sup>3</sup>, el cual genera el mismo valor de 160 MW.



**Figura. 53 Comparación del volumen y generación en su máximo y mínimo nivel de operación del Embalse Mazar**

*Fuente: Elaboración propia*

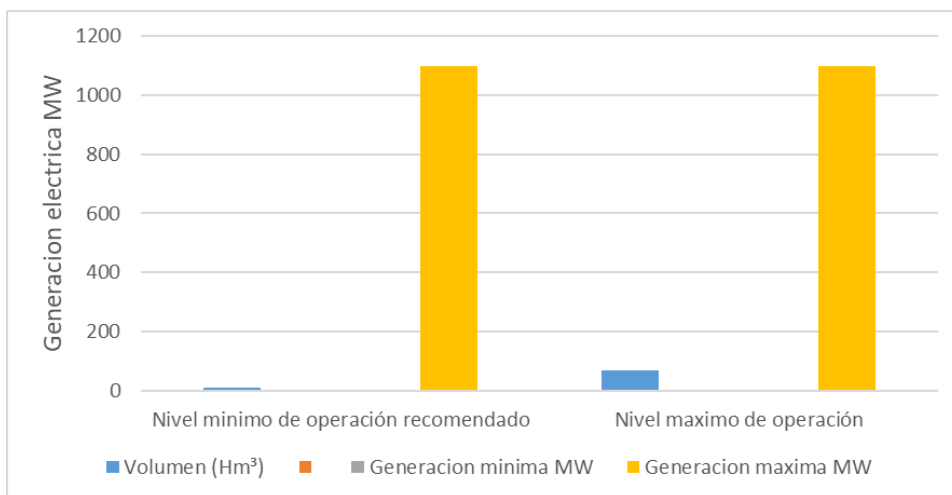
De igual manera en la figura 54 se presenta el nivel bajo con un valor de 1930 m.s.n.m. dispone de un volumen de 3.182 Hm<sup>3</sup>, por otro lado, el nivel mínimo de operación de diseño de 1935 m.s.n.m. cuenta con un volumen de 4.614 Hm<sup>3</sup>, en comparación con el nivel mínimo de operación recomendado de 1950 m.s.n.m. el cual posee un volumen de 10.413 Hm<sup>3</sup> y para concluir el nivel máximo de operación de 1991 m.s.n.m. dispone de un volumen de 69.470 Hm<sup>3</sup>.



**Figura. 54. Nivel VS Volumen del embalse Amaluza**

*Fuente: Elaboración propia*

Además, la figura 55 señala que el nivel mínimo de operación dispone de un volumen de 10.413 Hm<sup>3</sup>, que produce una generación mínima de 0 MW y una generación máxima de 1100 MW, al contrario del nivel máximo de operación el cual posee de un volumen de 69.470 Hm<sup>3</sup>, y posee una generación mínima de 0 MW y una máxima de 1100 MW.



**Figura. 55 Comparación del volumen y generación en su máximo y mínimo nivel de operación del Embalse Amaluza**

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.4 Recomendaciones técnicas para la operación de los embalses Mazar y Amaluza

La variación de los niveles máximos de operación posibilita un mejor aprovechamiento de la generación eléctrica, sin embargo, para que exista un buen plan de manejo los niveles mínimos de operación deben ser constantes.

En la tabla 54 se expresan los niveles mínimos de operación con su respectivo volumen de almacenamiento.

*Tabla 54: Niveles mínimos de operación.*

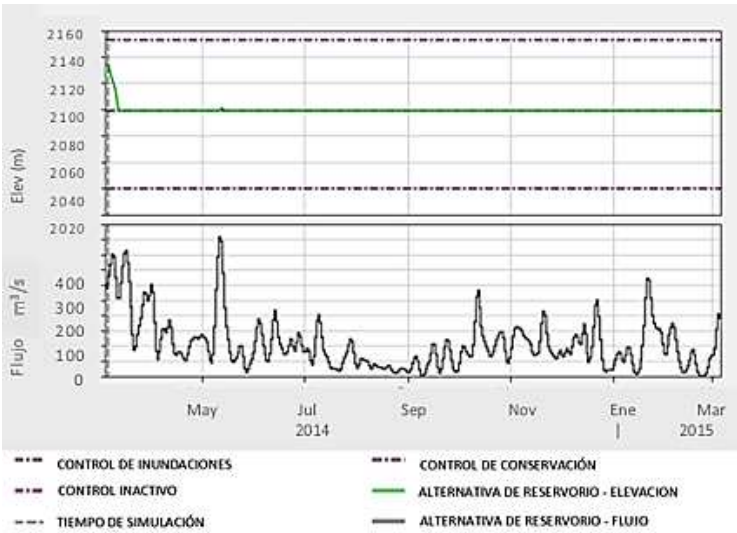
	<b>Nivel msnm</b>	<b>Volumen (Hm<sup>3</sup>)</b>
<b>Mazar</b>	2099	85.685
<b>Amaluza</b>	1950	10.413

*Fuente: Elaboración propia*

Pero en cambio se crearon nuevas alternativas para aprovechar el gran volumen que almacena la central Mazar y destinarlos al embalse Amaluza. Dado que la central Mazar brinda un gran aporte a la red eléctrica del país, la primera alternativa que se elaboró fue para dicho embalse, teniendo en cuenta que el nivel mínimo recomendado no disminuya evitando así futuros problemas, es por ello que al momento de trabajar con el mínimo de operación se recomienda que funcione con un solo generador y el segundo generador se emplee en las horas pico de máxima demanda, estos mínimos se generarían en tiempos de verano.

En cambio cuando se observa un nivel máximo de operación, que generalmente se presenta en épocas de invierno, la central Mazar tiene su pleno aprovechamiento para almacenar hasta su nivel máximo de operación de 2153 msnm al igual que el embalse Amaluza de 1991 msnm, no obstante las épocas invernales no se dan durante todo el año, por lo cual fue necesario realizar una reducción del máximo de operación del embalse Mazar hasta 2135 msnm la cual se puede apreciar en la figura 56, en donde se presenta el nivel diario a inicios de la serie

temporal es de 2135 msnm y luego de decaer hasta si nivel mínimo de operación 2099 msnm, con lo que continua disponiendo de una generación eléctrica satisfactoria.



**Figura. 56. Nivel diario del embalse Mazar con el máximo de operación propuesto**

*Fuente: Elaboración propia*

No obstante, en la figura 56 se observa que su generación eléctrica no se ve afectada, ya que durante toda la serie temporal el valor máximo de generación es de 160 MW al día y su mínimo de 143 MW al día.

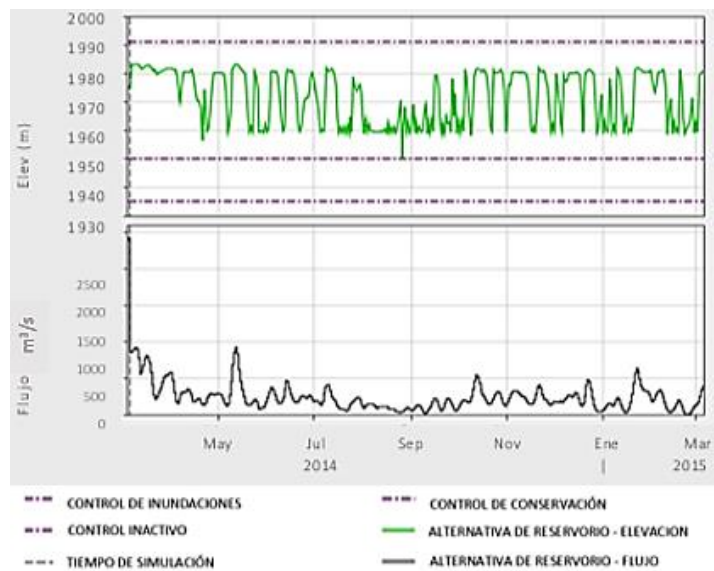


**Figura. 57 Generación eléctrica del embalse Mazar con el máximo de operación propuesto**

*Fuente: Elaboración propia*

Por cual se recomienda que en épocas de invierno el embalse almacene hasta su máximo de operación de 2153 msnm, para que en épocas de verano sea posible reducir hasta el nivel de 2135 msnm y el volumen de 133474232.6 de metros cúbicos, mientras que el volumen destinado al embalse Amaluza está comprendido entre el nivel de 2153 msnm, lo cual no afectara su producción.

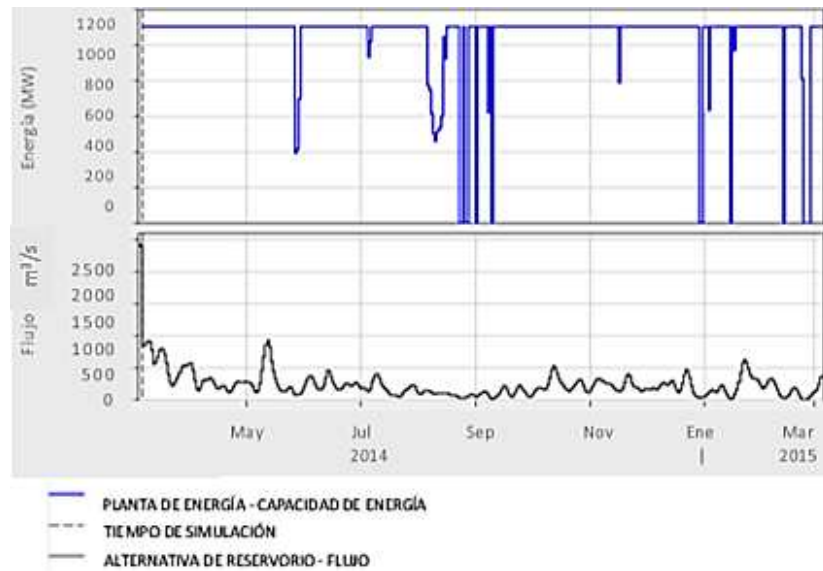
La segunda alternativa planteada consiste en la reducción del nivel de operación hasta 1975 msnm de la central de Amaluza cuando exista una época de verano prolongada y el volumen del embalse Mazar destinado al Amaluza haya disminuido del propuesto anteriormente. En la figura 58 se presente los inicios de la serie temporal el nivel diario se comporta de forma normal, es decir dentro del rango del mínimo y máximo de operación.



**Figura. 58 Nivel diario del embalse Amaluza con el máximo de operación propuesto**

**Fuente: Elaboración propia**

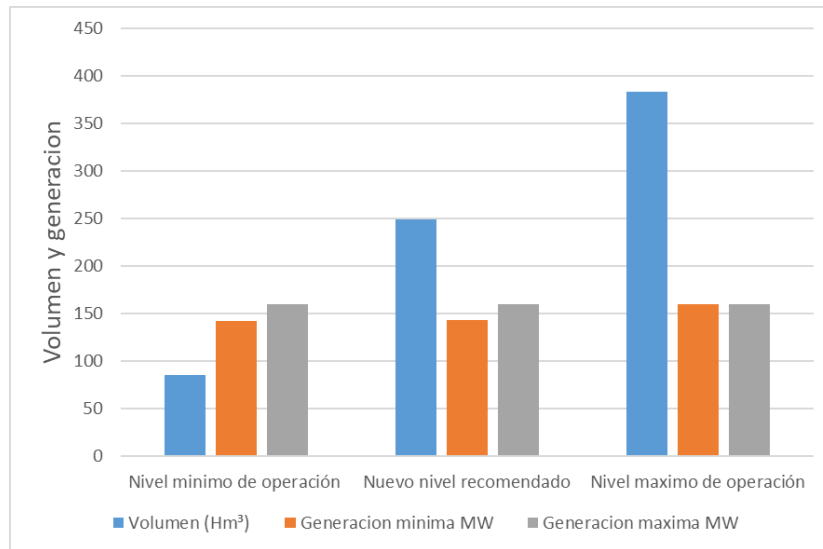
En cuanto a la generación eléctrica en la figura 59 se observa que durante toda la serie temporal en su mayoría se dispone de una generación eléctrica de 1100 MW mientras que algunos puntos se tiene una generación eléctrica de 0 MW.



**Figura. 59. Nivel diario del embalse Amaluza con el máximo de operación propuesta**

**Fuente: Elaboración propia**

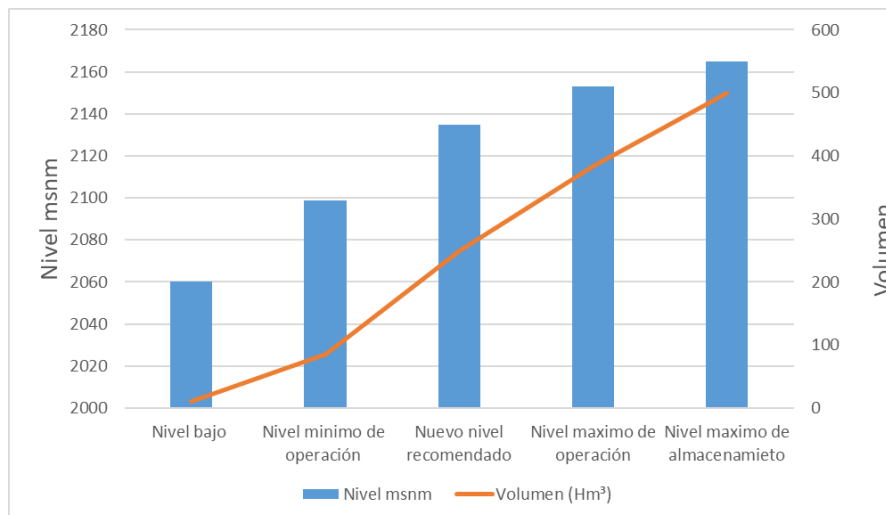
Adicionalmente, la figura 60 señala que el nivel mínimo de operación dispone de un volumen de 85.686 Hm<sup>3</sup>, que produce una generación mínima de 142 MW y una generación máxima de 160 MW, mientras que del nivel máximo de operación el cual posee de un volumen de 249.645 Hm<sup>3</sup>, y cuenta con una generación mínima de 143 MW y una máxima de 160 MW, finalmente el nivel máximo de operación dispone de un volumen de 383,119 Hm<sup>3</sup> el cual tiene una generación mínima de 160 MW y una máxima de 160 MW.



**Figura. 60 Comparación de los niveles operación del embalse Mazar**

**Fuente: Elaboración propia**

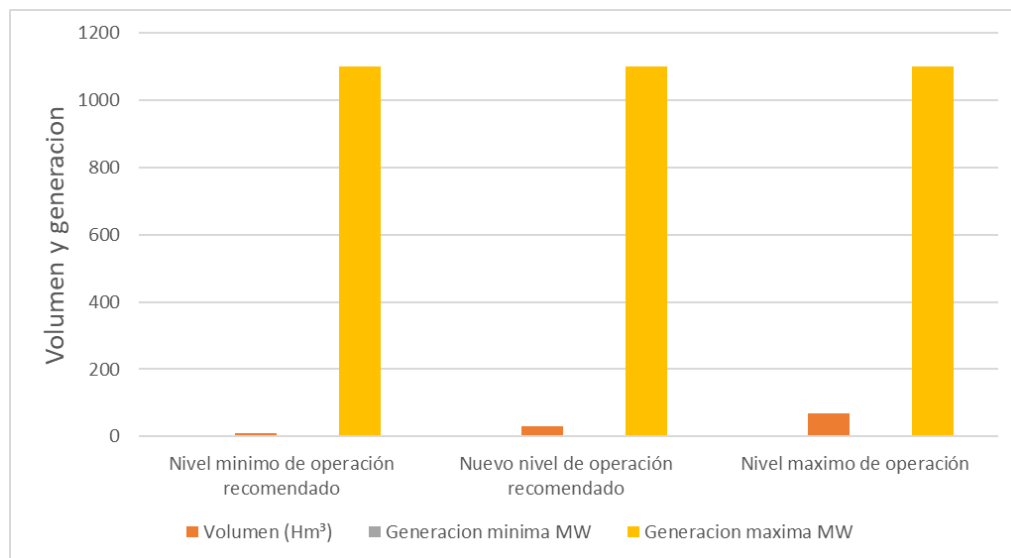
En la figura 61 se puede apreciar que el nivel recomendado posee un nivel 2135 msnm con un 249.645 Hm<sup>3</sup>, siendo optimo en comparación con sus niveles máximos y mínimos de operación.



**Figura. 61 Comparación de los niveles y volúmenes de operación del embalse Mazar**

**Fuente: Elaboración propia.**

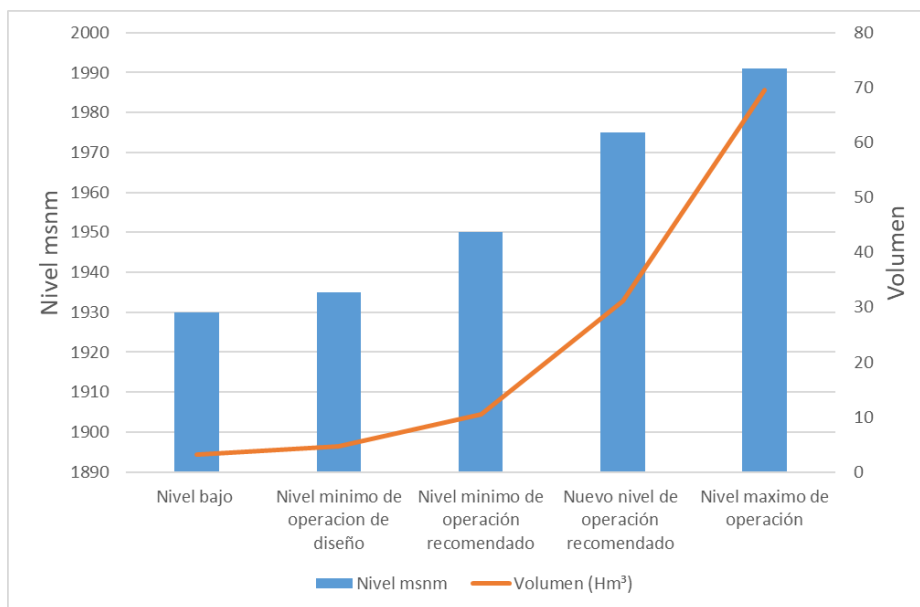
Así mismo, en la figura 62 se presenta el nivel mínimo de operación el cual posee un volumen de 10.413 Hm<sup>3</sup>, que produce una generación mínima de 0 MW y una generación máxima de 1100 MW, a diferencia del nivel máximo de operación el cual dispone de un volumen de 69.470 Hm<sup>3</sup>, y posee una generación mínima de 0 MW y una máxima de 1100 MW, finalmente el nivel máximo de operación cuenta con un volumen de 31.147 Hm<sup>3</sup> el cual tiene una generación mínima de 0 MW y una máxima de 1100 MW.



**Figura. 62 Comparación de los niveles operación del embalse Amaluza**

*Fuente: Elaboración propia*

En la figura 63 se puede apreciar que el nivel mínimo de operación recomendado posee un nivel 1950 msnm con un volumen de 10.413 Hm<sup>3</sup> y el nivel máximo de operación recomendado cuenta con un nivel 1975 msnm con un volumen 31.147, siendo optimo en comparación con sus niveles máximos y mínimos de operación.



**Figura. 63 Comparación de los niveles y volúmenes de operación del embalse Amaluza**

**Fuente: Elaboración propia**

## Capítulo 4: Resultados y Conclusiones

### 4.1 Análisis de Resultados

#### 4.1.1 Resultado modelación hidrológica en el HEC-HMS

- ✓ Una vez simulado en el software HEC HMS se obtuvo valores de caudales en los puntos deseados, como se expone en la figura 64, en la cual es posible apreciar que la subcuenca que presenta el caudal máximo es la Santa Bárbara la cual indica que la mayor aportación al embalse Mazar proviene de esta subcuenca, mientras que la subcuenca con el menor caudal de aporte a este embalse es la de Sidcay.

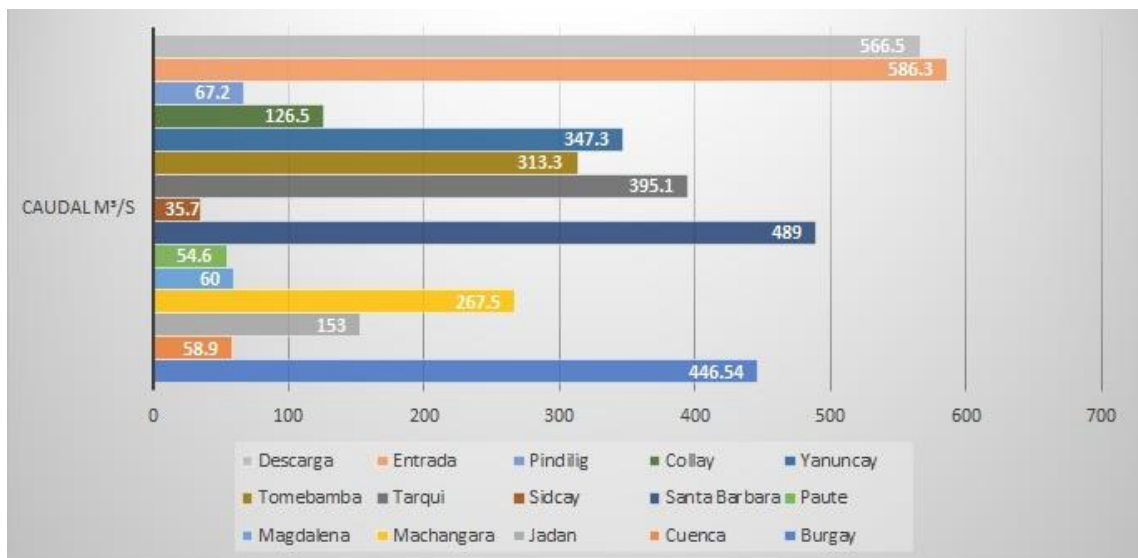


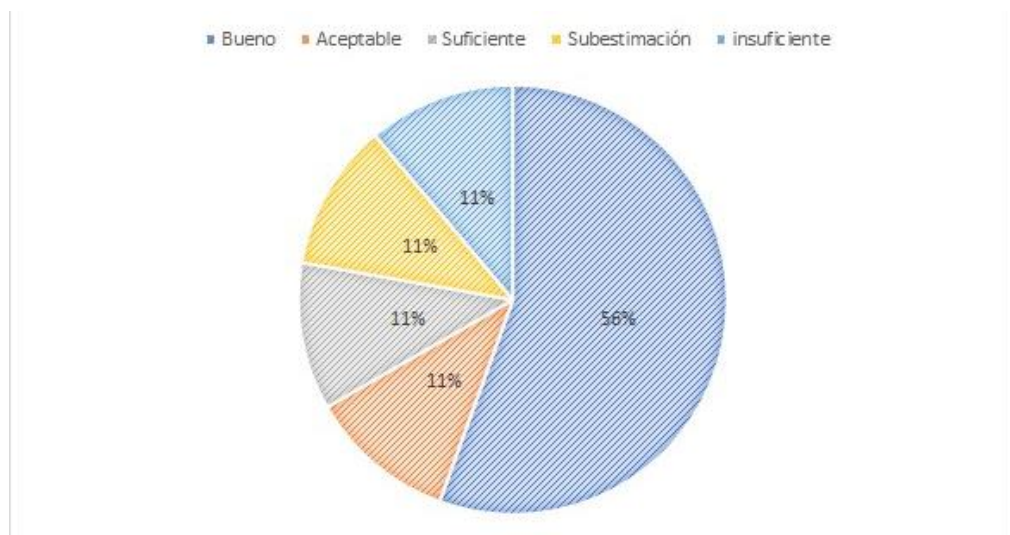
Figura. 64 Caudales obtenidos del HEC HMS

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2 Resultado calibración y validación en Rstudio

- ✓ Para la calibración y validación de se utilizaron diferentes métodos de correlación, como el coeficiente Nash-Sutcliffe NSE, coeficiente de determinación  $R^2$  y el coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta KGE, etc., los cuales fueron

comparados con los valores óptimos de los métodos, hasta que se obtuvo que el 56% de las correlaciones fueron buenos, el 11% aceptables, 11% suficientes, el otro 11% subestima las variables y por último el 11% es insuficiente. De acuerdo a los porcentajes obtenidos se puede decir que el modelo realizado es válido para su posterior aplicación para la optimización del volumen de agua en los embalses.



**Figura. 65 Porcentajes de calibración y validación del modelo.**

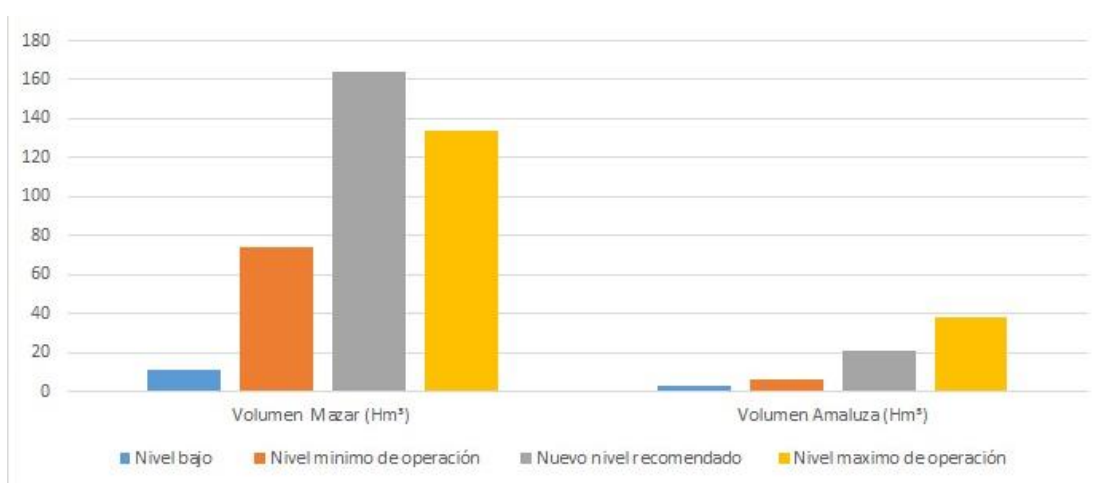
*Fuente: Elaboración propia*

#### **4.1.3 Resultado modelación hidrológica en el HEC-ResSim**

- ✓ Una vez realizado el modelo aplicando los niveles máximos y mínimos de operación se tuvo como resultado que la planta de Mazar si opera con su máxima elevación y se encuentra generando electricidad a su máxima disposición de 160 MW, de igual forma para la central Amaluza se obtuvo que con su nivel máximo de operación genera lo máximo de capacidad de 1100 MW.
- ✓ En cambio, con su nivel mínimo de operación la central Mazar genera entre 142 MW y 160 MW, de igual forma en la central Amaluza su generación se

encontraba entre 1100 MW y 0 MW, este último se debe a que cuando se trabaja con el nivel mínimo de operación la centrales toma como medida trabajar con la mitad de unidades con la finalidad de no dejar de aportar electricidad y cuando se tiene puntos de máxima demanda se trabaja con todas las unidades.

- ✓ En la figura 66 se señala, en el cual es posible observar que el embalse Mazar posee un volumen de almacenamiento considerable en comparación al de la represa hidroeléctrica Amaluza.



**Figura. 66 Comparación de Volúmenes de almacenamiento de los embalses Mazar y Amaluza**

*Fuente: Elaboración propia*

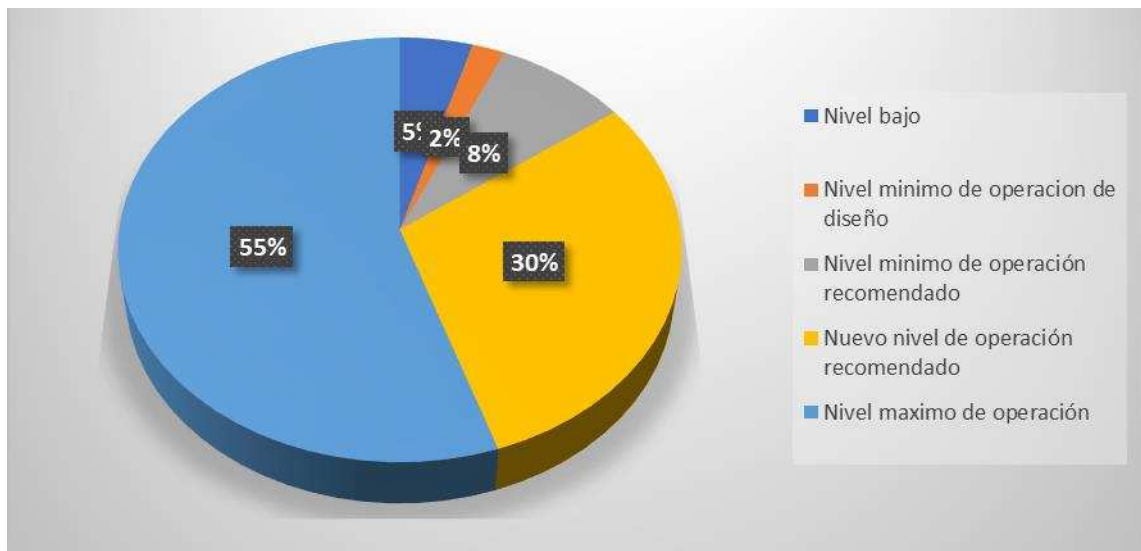
- ✓ Para las alternativas de optimización de los volúmenes se obtuvo se plantea que si el nivel máximo de Mazar se reduce a 2135 msnm la producción eléctrica no se ve afectada debido que se encuentra generando entre 143 MW y 160 MW, por la cual el volumen 172.68 de hectáreas cúbicas comprendido entre el nivel de 2135 msnm y 2153 msnm se debe destinar para el embalse Amaluza. En la figura 67 se describe que el volumen a ser destinado al embalse Amaluza es de un 27% del total de la represa Mazar.



**Figura. 67 Distribución del volumen de almacenamiento en función de sus niveles de operación del embalse Mazar**

**Fuente: Elaboración propia**

- ✓ Otra alternativa que se generó fue en el caso que el embalse Amaluza haya consumido todo el volumen que fue destinado de Mazar y para la cual se consideró que el embalse de Amaluza su nivel máximo sea reducido donde se obtuvo un buen resultado ya que si su nivel se reduce hasta 1975 msnm se sigue generando electricidad desde los 1100 MW hasta 0 MW esto se debe por los puntos de máxima demanda de la red eléctrica. En la figura 68 se observa que dado el caso que ocurra una reducción del 30% del volumen de almacenamiento del embalse, este todavía generará electricidad en su máxima capacidad, pero con decaimientos en ciertos puntos de la serie temporal.



**Figura. 68** Distribución del volumen de almacenamiento en función de sus niveles de operación del embalse Amaluza

**Fuente:** Elaboración propia

Las partículas de sedimento, producto de la erosión en una cuenca hídrica, se transportan a lo largo del río con el flujo de agua. La construcción de una presa para regulación provoca la obstrucción del flujo y, por lo tanto, una reducción considerable de la velocidad en el embalse que causa sedimentación y genera una reducción de la capacidad de almacenamiento que afecta la vida útil del cuerpo de regulación (Ochoa-García, 2021).

El proyecto hidroeléctrico Mazar entro en funcionamiento a partir de año 2010 es por esto que para la aplicación del modelo se emplea las batimetrías del año 2013. Cabe aclarar que este proyecto no tiene muchos años en operación y es por tal razón que no existe gran influencia en la acumulación de sedimentos.

La última batimetría realizada en el embalse Amaluza fue en el año 2018 pero para la construcción del modelo de optimización se empleó la batimetría del año 2013, debido a que la serie temporal empleada para el modelo hidrológico se encuentra desde el año 2005 hasta 2015

la cual cumplía con los requerimientos necesarios la construcción del modelo (CELEC EP, 2018).

Como se observa en la tabla 55 se denota la batimetría levanta en los diferentes años con su respectivo volumen.

*Tabla 55: Registro histórico batimetrías.*

<b>Batimetría</b>	<b>Agua Hm<sup>3</sup></b>	<b>Sedimento Hm<sup>3</sup></b>	<b>Útil Hm<sup>3</sup></b>	<b>Muerto Hm<sup>3</sup></b>
<b>Inicial</b>	125.9	0	71.67	54.23
<b>1986</b>	118.3	7.6	70.65	47.65
<b>1990</b>	107	18.9	71.36	35.64
<b>1994</b>	99.95	25.95	70.34	29.61
<b>2000</b>	88.24	37.66	65.76	22.48
<b>2018</b>	66.41	59.49	49.48	16.93

*Fuente: (CELEC EP, 2018)*

Se puede observar en la tabla 55 que hay una variación significativa de volúmenes a lo largo del tiempo donde a éxito una variación del 47% de volumen de agua almacenado desde su inicio hasta el año 2018, así como la acumulación de sedimentos a llegado a 59.49 Hm<sup>3</sup> durante 35 años, en cuanto al volumen útil se tiene una reducción de 31% de volumen inicial y por ultimo el volumen muerto tiene una reducción del 69% del volumen inicial.

## **4.2 Conclusiones**

- ✓ En función de los sistemas de información geográfica se obtuvo los parámetros geomorfológicos de la cuenca hidrográfica de estudio necesarios para realizar el modelo hidrológico.
- ✓ La construcción del modelo hidrológico en el software HEC HMS se ejecutó mediante el método SCS (Soil Conservation service), a partir del cual se obtuvo el escurrimiento superficial de los puntos considerados de interés en la zona de estudio. Sin embargo, no fue posible emplear la herramienta de optimización para la

calibración del modelo, por lo cual se requirió aplicar el método de tanteo, para posteriormente utilizar dichos datos en el programa Rstudio.

- ✓ Para la calibración y validación del modelo se empleó el software Rstudio, a través de los resultados obtenidos del HEC HMS, que al modificar los parámetros de calibración como el número de curva y los factores de Muskingum se adquirió los parámetros de correlación, de los cuales su mayoría obtuvo valores aceptables, a excepción de los métodos BIAS y ME, los cuales son basados en la media aritmética, debido que los valores de los caudales observados y calculados se generan con una variación en ciertos puntos de la serie temporal, se hace inviable su utilización.
- ✓ Para la modelación de las plantas hidroeléctricas Mazar y Molino se utilizó el programa HEC ResSim, en el cual se obtuvo la generación eléctrica de cada embalse, en donde con el nivel mínimo de operación sus resultados eran satisfactorios en la mayoría de la serie temporal, sin embargo, el embalse Amaluza en algunos puntos de la serie temporal no generaba electricidad, por otro lado al analizar con el máximo nivel de operación fue posible apreciar que usualmente se generaba su máxima capacidad.
- ✓ Para la optimización de los volúmenes de agua en los embalses Mazar y Amaluza, se propone reducir la cota máxima de operación a 2135 msnm de la represa Mazar con la cual su generación eléctrica habitual no se ve afectada, y el resto de volumen almacenado sea destinado al embalse Amaluza para asegurar el correcto y eficaz desempeño de ambas presas. Por otro lado, se plantea que dado el caso que se consume toda el agua destinada para Amaluza se disminuya hasta la cota 1995 con lo cual en gran parte de la serie temporal trabaja con normalidad, sin embargo, en ciertos puntos de la simulación su generación eléctrica es de 0 MW, esto se debe a que su nivel diario se reduce a un valor menor al mínimo de operación, siendo una

de las principales causas la existencia de caudales insuficientes de entrada durante su almacenamiento diario en la ejecución del software de simulación.

- ✓ La construcción del modelo hidrológico empleando el HEC-HMS facilita de manera adecuada la operación, debido que a este influyen desde su delimitación de subcuenca hidrográficas, obtención de parámetros geo morfométricos hasta el estudio de las series hidrometeorológicas.

### XIII. Bibliografía

- Alvárez, D. F. (2013). *Evaluacion de metodos para la gestion optima de los embalses Molino y Mazar*. Cuenca.
- Alvaro Brenes, V. S. (2012). *ELEMENTOS DE CLIMATOLOGIA Y SU APLICACION DIDACTICA A COSTA RICA*. Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- Anguilo, A. M., Albaladejo Montoso, J., Arambu Maqua, M. P., Carrasco Gonzalez, R. M., Castillo Sanchez, V., Ceñal Gonzalez-Fierro, M., & Valero Huete, F. (s.f.). Capítulo X. Agua. En Guía para la elaboración de estudios del medio físico. 447-477. Madrid, España: Fundación Conde del Valle de Salazar (E.T.S.I. de Montes), Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. ISBN 978-84-96442-55-9.
- Aranda, C. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Mexico: Editorial Universitaria Potosina.
- Aranda, D. F. (1984). *Procesos del Ciclo Hidrologico*. UASLP.
- Arnold, J., Moriasi, D., Gassman, P., Abbaspour, K., & White, M. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Biological Systems Enegineering*, 20.
- Bizzotto, F. (2016). *MORFOLOGIA, GEOLOGIA Y VEGETACION DE LA CUENCA*. Mendoza.
- Botero, P. J. (1978). Interpretación de imágenes para estudios de suelos. Bogota, Colombia: Centro de Investigación y desarrollo en .
- Breña Puyol, A. F., & Jacobo Villa, M. A. (2006). *Principio y Fundamentos de la Hidrología Superficial*. México.

- Cabrera Balarezo, J. J. (2017). Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo. Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD DE CUENCA.
- Campos Aranda, D. F. (1987). Procesos del ciclo hidrológico. Primera Edición. San Luis Potosí. San Luis Potosí, Mexico: Editorial Universitaria Potosina. UASLP, Facultad de Ingeniería.
- Cardona, B. L. (2014). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. 8.
- Carmona Rojas, C. A. (2019). Pronóstico de volúmenes de deshielo en cuencas de la Región del Maule. Chile: Memoria de pregrado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Castillo Sarmiento, H. F. (2019). Validación y calibración del modelo HEC-HMS para la simulación del tránsito de avenidas en una cuenca hidrográfica con antecedentes asociados a fenómenos de inundación. Bogotá: Especialización en Planeación Ambiental y Manejo de Recursos Naturales, Universidad Militar Nueva Granada.
- Celi Contreras, M. V., & Vélez Arcentales, M. A. (2013). *Análisis de escenarios y estudio de un balance hídrico con aplicación al embalse Macul 1 empleando programa HEC-ResSim*. Cuenca.
- Claros Rocabado, V. (2018). Influencia del uso de un modelo "Data Based Mechanistical" (DBM) en resultados de modelos hidrológicos continuos aplicados a cuencas alteradas. Santiago de Chile: Tesis de pregrado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

- de Almeida, I. K., Almeida, A. K., Anache, J. A., Steffen, J. L., & Alvess Sobrinho, T. (2014). Estimation on time of concentration of overland flow in watersheds: a review. *Geociências*, 33(4), 661-671.
- Diaz Delgado, C., Mamadou Ba, K., Iturbe Posadas, A., Esteller, M. V., & Reyna Sáenz, F. (1999). Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alto del río Lerma, Estado de México. *Ciencia Ergo Sum*, 6(2), 124-134.
- Donoso Correa, M. E. (2002). *La cuenca del rio Paute: Diagnostico y propuesta de manejo integral. Politicas de desarrollo agropecuario*. Cuenca.
- Draga Amaluza. (2013). *Informe sobre la sedimentacion del embalse Amaluza*. CELEC EP.
- Draga Amaluza I. (2013). *Informe sobre la sedimentacion del Embalse Mazar Batimetria de Noviembre de 2013*. CELEC EP.
- EP, C. (2013). *Complejo Hidroeléctrico Paute Integral*. Cuenca.
- Espinoza Vilca, S. (2018). Evaluacion y comparacion de seis modelos de simulacion de caudales y su validacion en la bocatomas Apacheta, Choccoro y Chicllarazo de la Irrigacion Cachi - Ayacucho -2016. Ayacucho, Peru: Tesis de pregrado, Escuela Profesional de Ingenieria Agricola.
- Espinoza, D. O. (2008). *HidroPaute*. Monsalve Moreno.
- ESTADO, B. O. (2016). *Norma 5.2-IC Drenaje Superficial de la instrucción de carreteras*. Madrid.
- Fallas, J. (2003). *SISTEMAS INTEGRADOS DE INFORMACION GEOGRAFICA, CONCEPTOS BÁSICOS DE CARTOGRAFÍA*. Heredia.

- Gálvez, J. J. (2011). *AGUA SUBTERRÁNEAS - ACUÍFEROS*. Lima.
- Gaspari, Rodríguez, Senisterra, Delgado, & Basteiro, 2013. (2017). Aplicacion de modelos hidrológicos de las microcuencas de los bosques y vegetacion. *Univesidad politecnica salesiana*, 172.
- Geoge, P. (2000). *Diccionario de la Geografía* . Madrid: Akal, S.A .
- Graneri, J. (2014). *Análisis de datos hidrológicos y procesos de memoria larga*. La Republica.
- Gualpa, M., Quito, A., & Adrián Culcay. (2015). Caracterización morfométrica de áreas de drenaje de las estacuones hidrológicas de la red de ETAPA EP. *Programa de Monitoreo y Vigilancia de Recursos Hídricos y de Clima Sub Gerencia de Gestión Ambiental* (pág. 28). Cuenca: ETAPA EP.
- Gutiérrez, D. A. (2016). *ESTUDIO MORFOMÉTRICO Y CÁLCULO DE CAUDAL DE CRECIENTE EN LA HACIENDA POZO RUBIO POR MÉTODO RACIONAL ENTRE CAÑO VENADO Y CAÑO EL PESCADO*. Bogota.
- HEC-HMS. (2017). Aplicacion de modelos hidrológicos de las microcuencas del area de bosque y vegetacion. *Univesidad politecnica salesiana*, 172.
- HIDROPAUTE, S. (2006). *PROYECTO HIDROELECTRICO MAZAR*.
- Ibáñez Asensio , S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. (2011). Morfología de las cuenca hidrológicas.
- Ibáñez Asensio, S. M. (2011). Morfología de las cuencas hidrológicas. Escuela técnica Superior de Ingeniería, Agronómica y del Medio Natural, Universidad Politecnica de Valencia.

- IDEAM Instituto de Hidrologia, M. y. (2019). GUIA METODOLÓGICA DE LA OPERACIÓN. *IDEAM Instituto de Hidrologia ,Meteorologia y Estudios Ambientales*, 2.
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Analisis de las variables morfométricas que nos la definen por Montserrat Jardí. 28.
- Jerves, L. (2013). *Informe sobre la sedimentacion del embalse Amaluza*.
- Jerves, L. (2013). *Informe sobre la sedimentación en el embalse Mazar*.
- Klipsch, J., & Hurst, M. (2013). *HEC-ResSim Reservoir System Simulation*. Washington, D.C.
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, J. (1988). Hidrologia para ingenieros. Hydrology for engineers.
- María, S. G., Carlos, R. C., & Santiago, S. S. (2007). *OPTIMIZACIÓN DE LA REGLA MENSUAL DE OPERACIÓN DEL EMBALSE DE SALVAJINA*. Cali.
- Montserrat Ferrer, J. R. (1995). GENERACIÓN AUTOMÁTICA DEL NÚMERO DE CURVA CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. 16.
- Nania, L. (2007). *Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1*. Granada.
- Nash , J., & Sutcliffe , J. (1970). River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles *Journal of hydrology*,. *Revista de hidrología*, 10(3), 282-290.
- Organización Meteorológica Mundial. (1994). *GUÍA DE PRACTICAS HIDROLÓGICAS*. Ginebra.
- Organizacion Metereologico Mundial-N. (1994). Guia de Practicas Hidrologicas.
- Organization, W. M. (2012). OrInternational glossary of hidrology. En WMO/UNESCO, *OrInternational glossary of hidrology* (pág. 461).

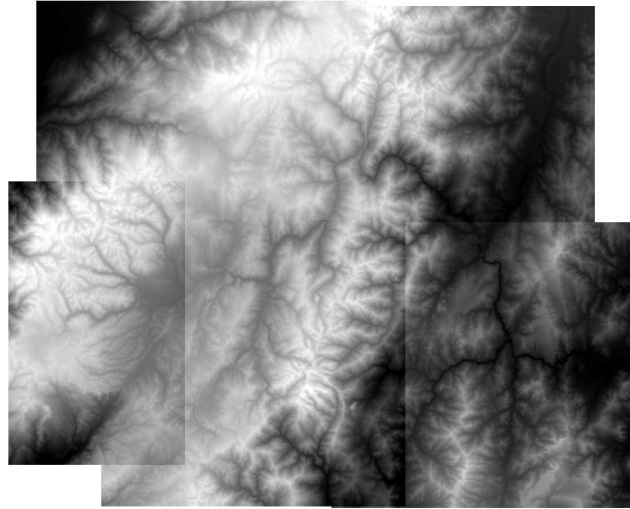
- Quizhpi C., M. (2018). Amazing 4K Drone Footage of Mazar Dam in Ecuador! Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=8CrxFUaf5w>
- Quizhpi C., M. (2018). Ecuador Central Hidroeléctrica Paute 2018 DJI Phantom Drone 4k Tourist Ecuador AMA LA VIDA. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=rMXLN8juns>
- Racca, J. M. (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología*, 77(1-2), 31-38.
- Ramos, D. A. (23 de Septiembre de 2019). *mappingGIS*. Obtenido de mappingGIS: <https://mappinggis.com/2019/02/como-reclasificar-una-imagen-en-qgis/>
- Rio, J. C. (2016). *ESTUDIO HIDROLOGICO E HIDRAULICO PARA DISEÑO DE PUNTE*.
- Rojas, P. (9 de Febrero de 2015). *INGECIV*. Obtenido de INGENCIV: <https://ingeciv.com/que-es-una-curva-hipsometrica/>
- Sáenz, G. M. (1995). *HIDROLOGIA EN LA INGENIERIA*. Santafé de Bogotá: Departamento de Publicaciones escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sanchez Velez, A. S. (1987). Conceptos elementales de hidrología forestal agua,suelo y vegetación. En *La cuenca hidrográfica* (págs. 57-97).
- Sellers Chester, B. S. (2017). Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador. *CONFibSIG*, 14.
- Sivisaca, O. L. (2011). *ESTUDIO HIDROLÓGICO Y BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CATAMAYO HASTA LA ESTACIÓN EL ARENAL EN EL SITIO EL BOQUERÓN, PROVINCIA DE LOJA*. Loja.

- Tito, B. (s.f.). *Ingenieria Ambiental*. Obtenido de Estaciones metereologicas automaticas:  
<https://ingenieriaambiental.net/estaciones-meteorologicas-automaticas/>
- U.S. Geological Survey. (1996). Modelo GTOPO30.
- Valles León, J. R. (2017). Aplicación de redes neuronales artificiales en pronóstico hidrológico, caso de estudio: cuenca río Grande de San Miguel. *Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)*.
- Vera , P. A., & Lopez Jara , C. (2020). Modelacion hidrológica e hidrodinámica para el estudio de inundaciones en la cuenca baja del río Jubones en diversos escenarios de funcionamiento de la represa Minas-San Francisco. Cuenca: Tesis de pregrado, Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción, Universidad Católica de Cuenca.
- Way, D. S. (1978). . The interaction between urbanization and land. quality and quantity in environmental planning and design. Massachusetts, Estados Unidos: Landscape Architecture Research Office.
- William, C., Percy, E., Viker, P., Claverth, R., Ronald, R., Jhonny, T., & Ever, Z. (2013). *ESTUDIO DE UNA CUENCA EN LA CIUDAD DE HUANCAMELICA*. Huancavelica.
- WONDYE, F. (2009). *ABAY BASIN WATER ALLOCATION MODELLING USING Hec-ResSim*. Adís Abeba.

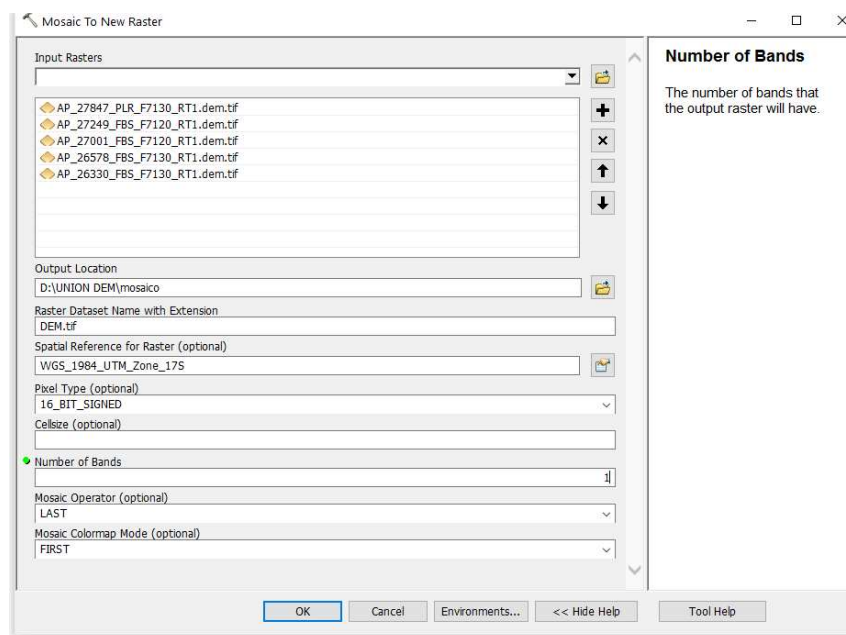
#### **XIV. Anexos**

## ARGIS

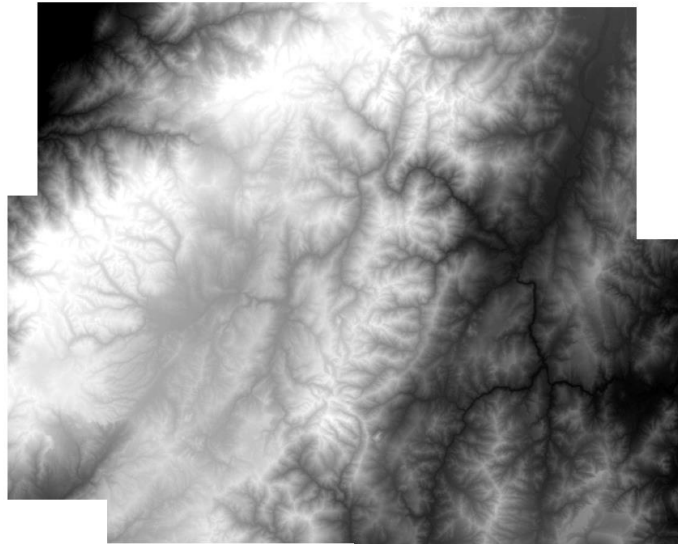
Imágenes DEM descargadas de la pagina ALOS PALSAR



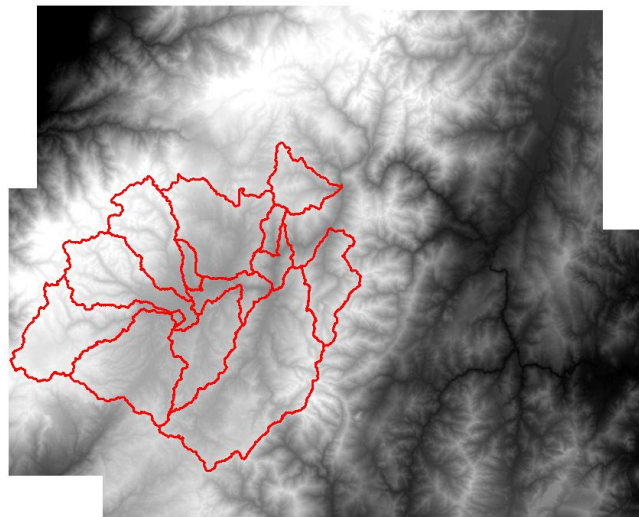
Se realizo una union de todos los DEM empleando una herramienta denominada  
mosaic to new Raster



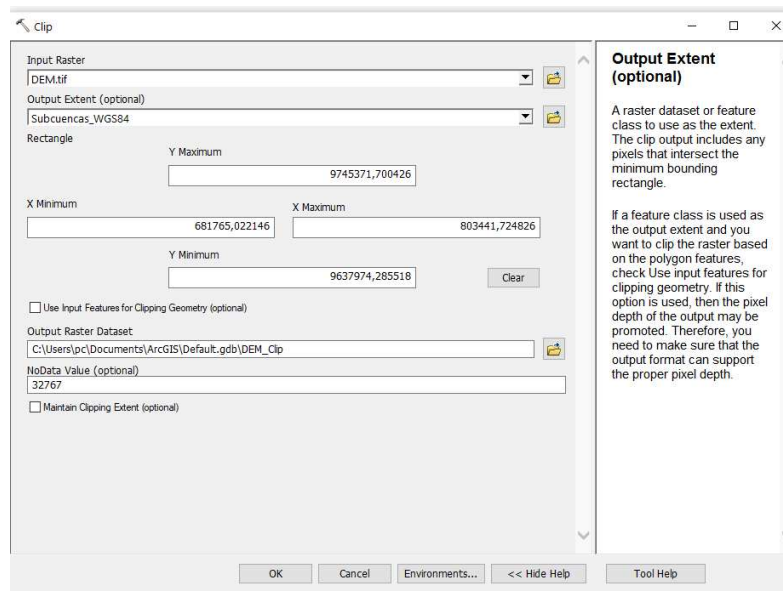
Resultado de la union



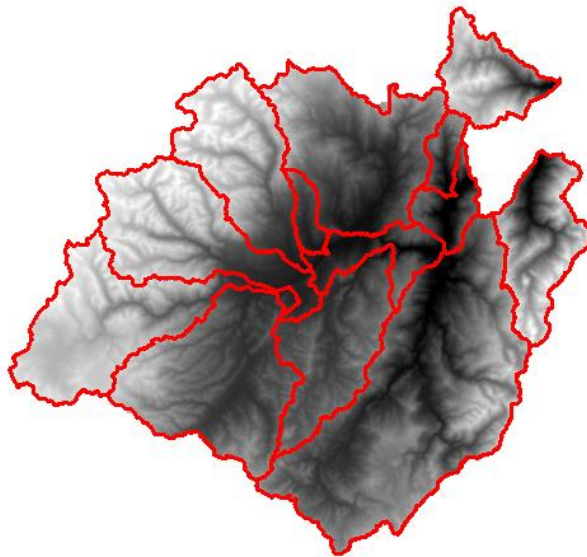
Se realizo una recorte de las subcuencas en analisis



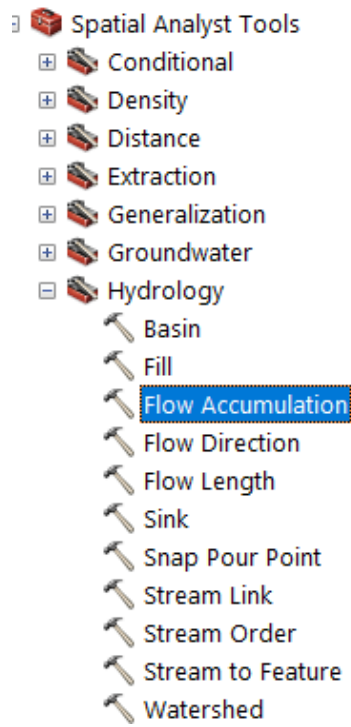
Se empleo la herramienta clip, esta opcion no ayuda a recortar imagen DEM en  
funcion de poligonos de delimitacion



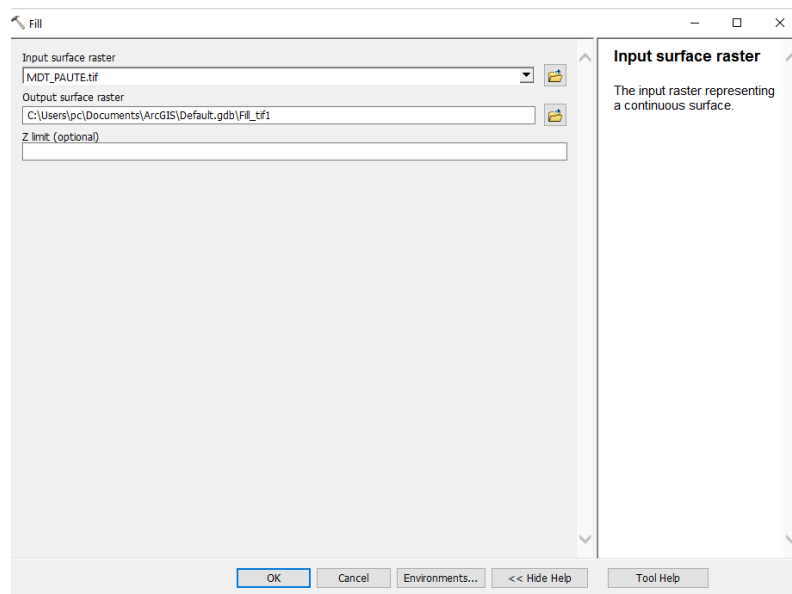
Resultado del clip



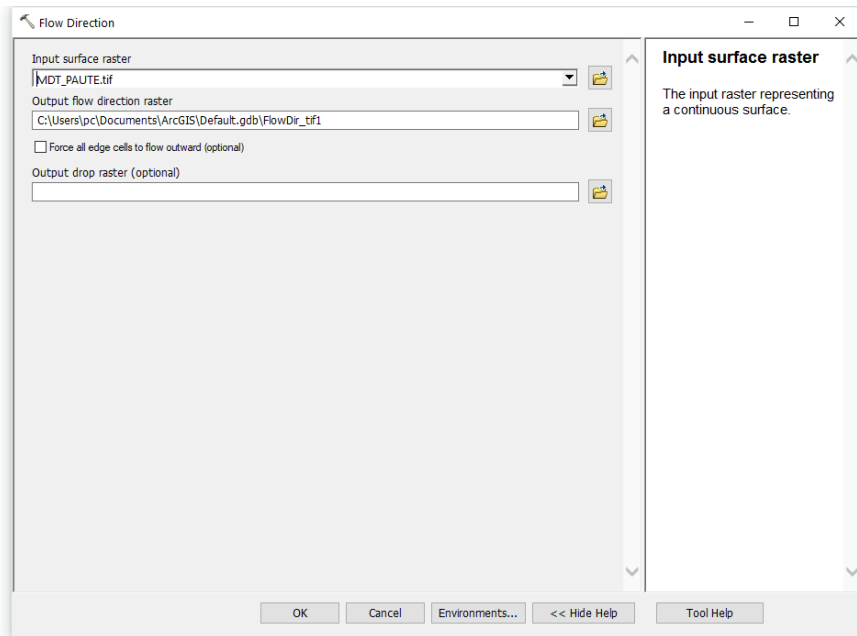
Herramientas para la delimitas para la creacion de parametros geomorfometricos



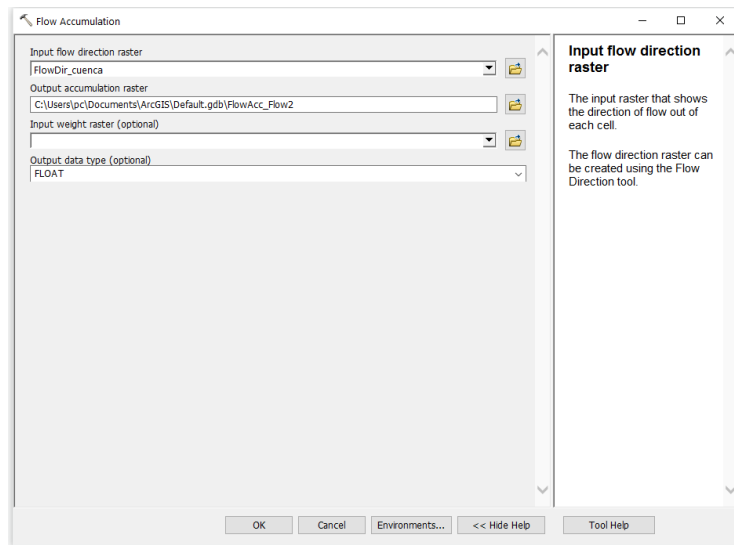
Herramienta para la correccion del modelo digital del terreno



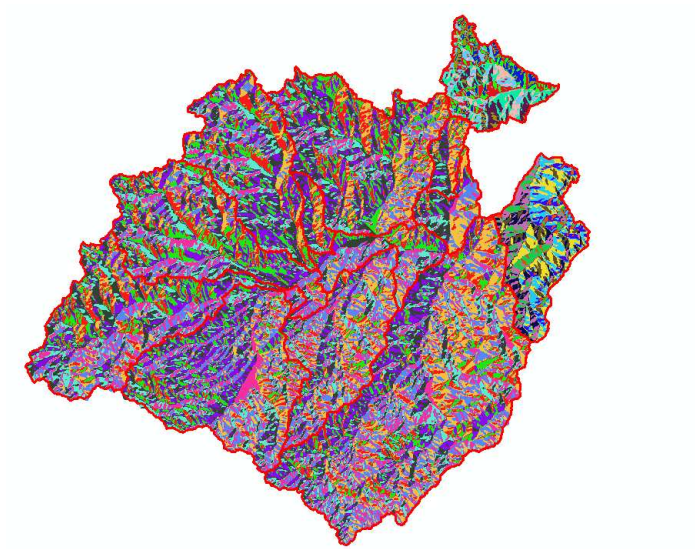
Herramienta para la direccion del flujo



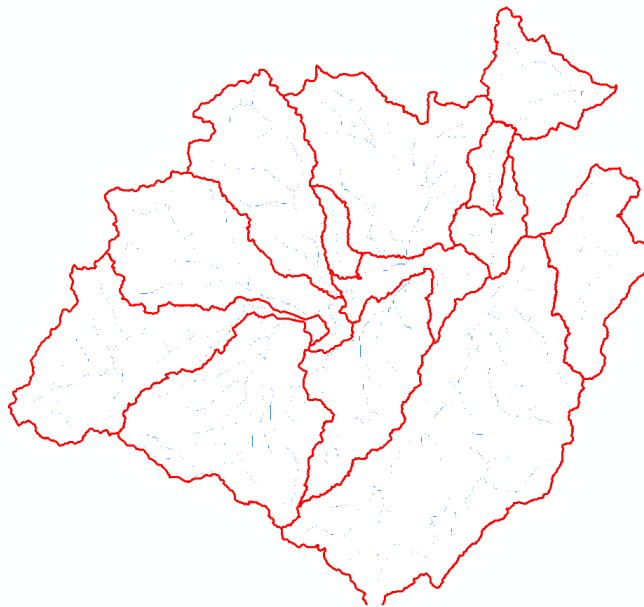
Herramienta para el flujo acumulado de la cuenca de analisis



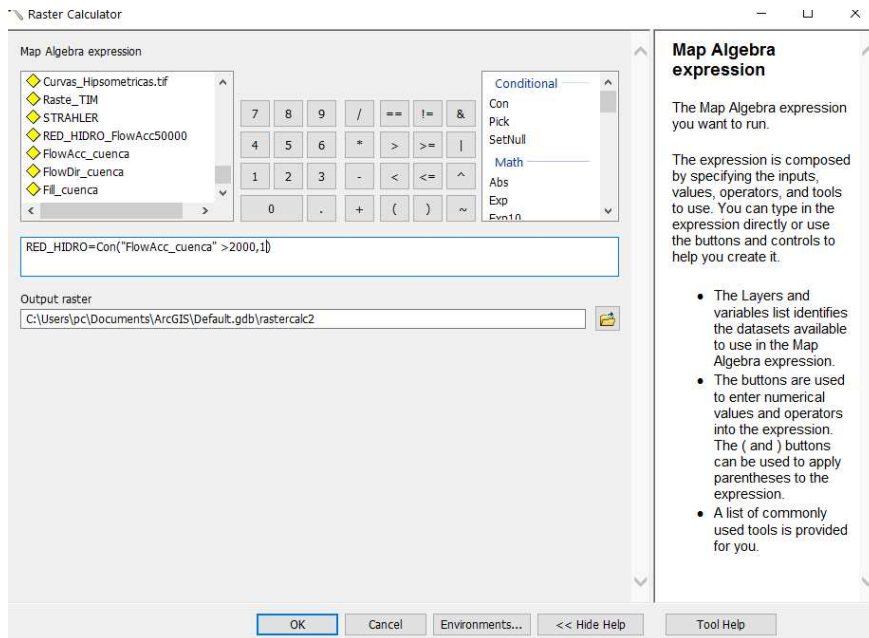
Flujo directo



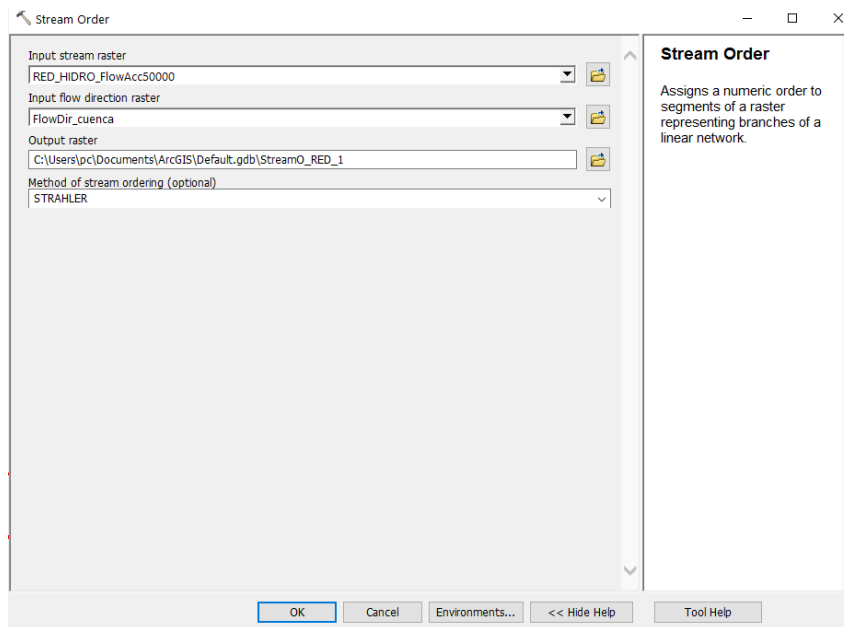
Flujo acumulado



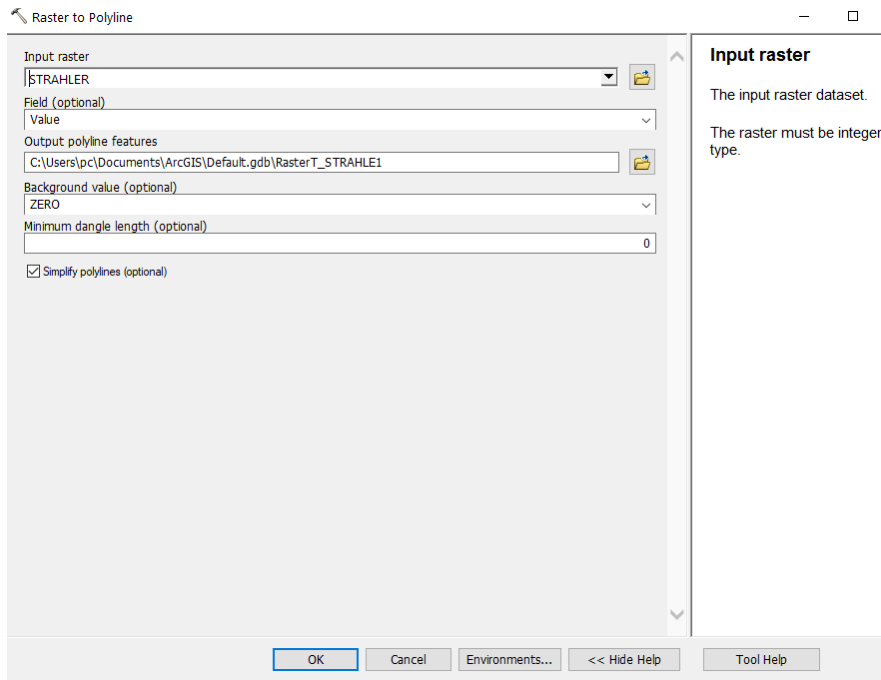
Herramienta para la creacion de la red hidrica de la cuenca de analisis se emplea el valor el 50000 por el numero de pixcel esto indica que partir de ese punto se va genera nuestra red hidrica y el valor de 1 indica que va tomar solo los valores verdaderos.



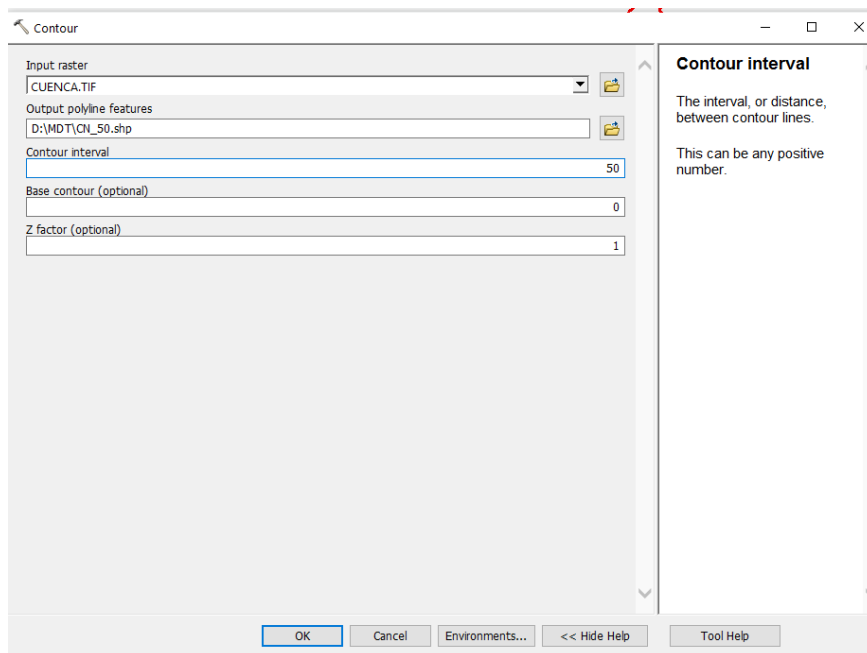
Herramienta para la creacion del orden de la cuenca, se empleo el metodo de Strahler



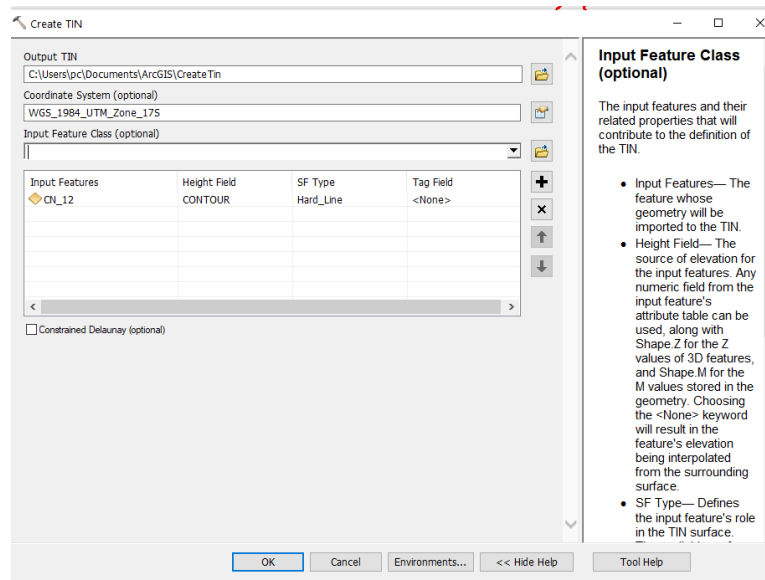
Herramienta para convertir en archivo SHP apartir del archivo DEM.



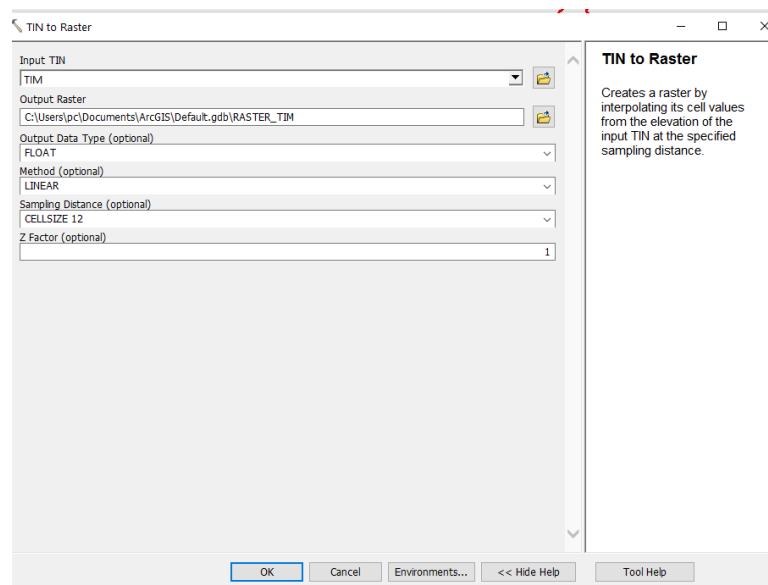
Herramienta para crear curvas de nivel



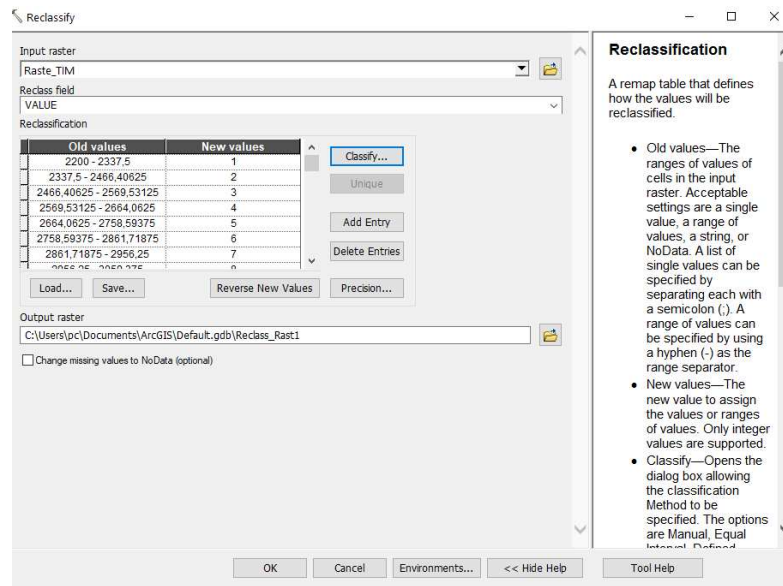
Herramienta para la creacion de una TIM



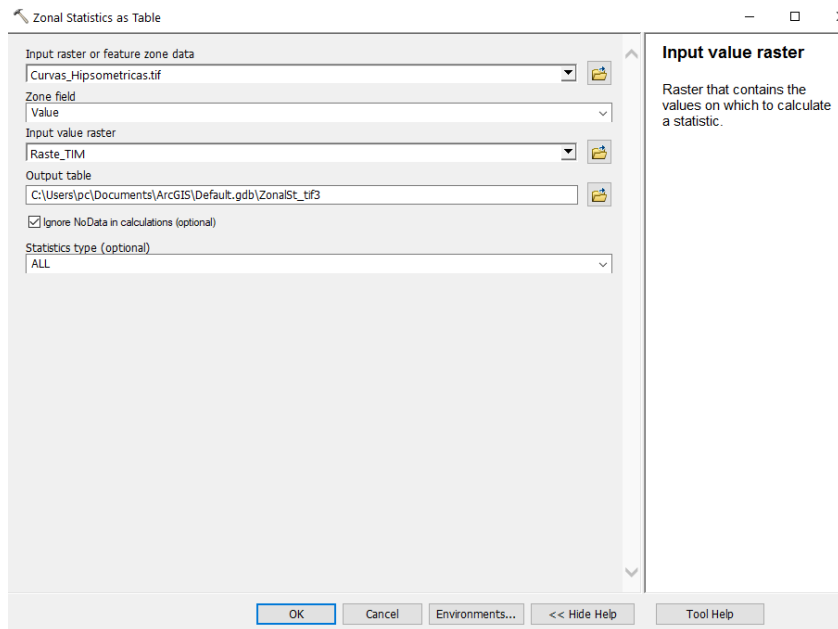
Herramienta para para creacion de una raster apartir de una TIM esto ayudará para la  
 cracion de curvas hipsometricas



Se empleo la herramienta Reclassify para la obtencion de las curvas hipsometricas las cuales se realizaron 20 intervalos. Lo que realiza la herramienta Reclassify es resta la cota mayor de la menor y dividir para el numero de intervalos.



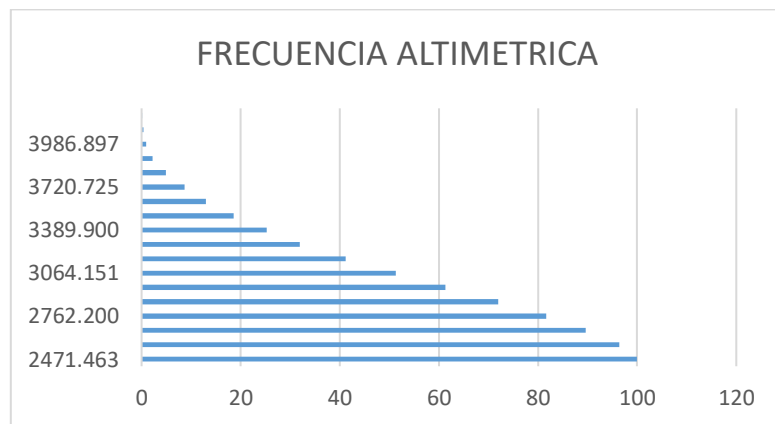
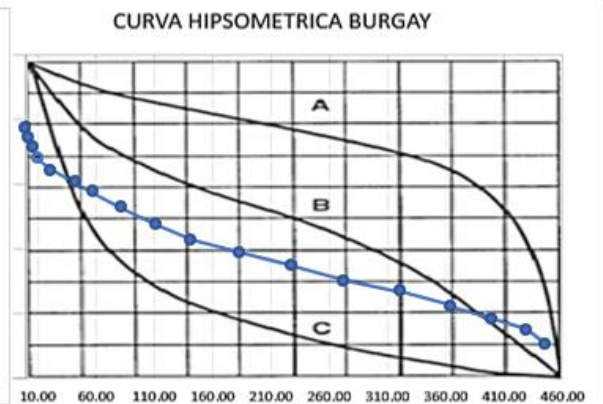
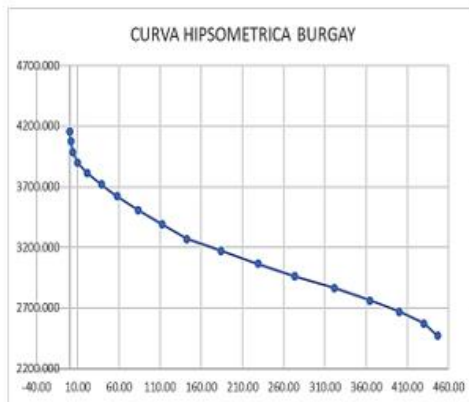
Una ves obtenido la reclasificacion se realizo la exportacion de los datos empleando la herramienta Zonal statistics as table para la construccion de la curva hipsometrica y la construccion de la frecuencia altimetricas.



Curva hipsométrica Burgay

<b>Curvas hipsométricas</b>							
<b>N. de orden</b>	<b>Cota mínima</b>	<b>Cota máxima</b>	<b>Áreas parciales (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área acumulada (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área que queda sobre la superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje de área entre C.N.</b>	<b>Porcentaje de área sobre C.N.</b>
1	2403.1792	2471.463	16.30	16.30	446.54	3.649	100
2	2461.6741	2573.190	29.89	46.18	430.25	6.693	96.35068014
3	2564.2454	2671.501	35.68	81.86	400.36	7.990	89.65763023
4	2660.0918	2762.200	43.25	125.11	364.68	9.686	81.66767266
5	2752.6292	2866.488	47.85	172.96	321.43	10.715	71.98152473
6	2851.7192	2961.993	44.57	217.53	273.58	9.981	61.26692035
7	2952.0889	3064.151	45.38	262.91	229.01	10.162	51.28579801
8	3054.7502	3172.655	41.23	304.14	183.63	9.233	41.12349211
<b>(Continuación) Curva hipsométrica Burgay</b>							
<b>N. de orden</b>	<b>Cota mínima</b>	<b>Cota máxima</b>	<b>Áreas parciales (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área acumulada (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área que queda sobre la superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje de área entre C.N.</b>	<b>Porcentaje de área sobre C.N.</b>

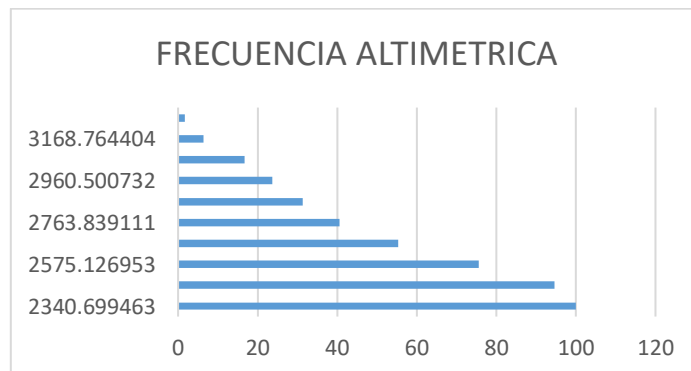
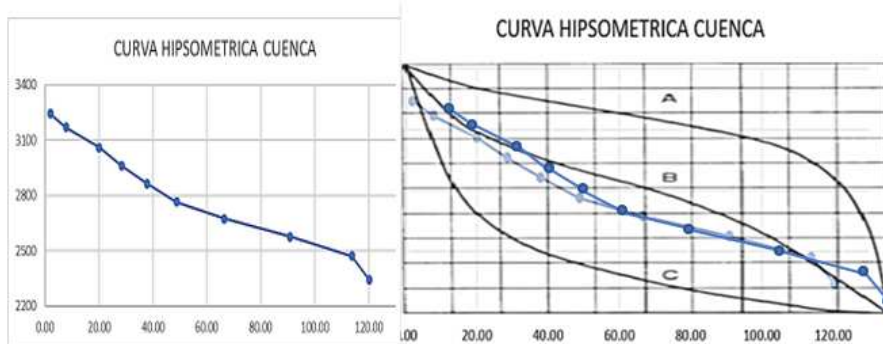
9	3158.8943	3270.702	29.84	333.98	142.40	6.682	31.89016315
10	3262.7659	3389.900	29.39	363.37	112.57	6.583	25.20817041
11	3382.2058	3510.058	25.32	388.70	83.17	5.671	18.62558719
12	3502.5854	3622.738	19.20	407.89	57.85	4.299	12.95448541
13	3615.5642	3720.725	16.97	424.86	38.65	3.799	8.655661987
14	3709.5078	3811.125	11.60	436.46	21.69	2.598	4.856335564
15	3802.3936	3897.265	5.73	442.19	10.08	1.284	2.258321305
16	3889.0635	3986.897	2.82	445.01	4.35	0.630	0.974255347
17	3974.9775	4074.137	1.19	446.20	1.54	0.267	0.343821896
18	4062.4272	4154.681	0.34	446.54	0.34	0.077	0.076770328
			446.54			100.000	



Curva hipsométrica cuenca

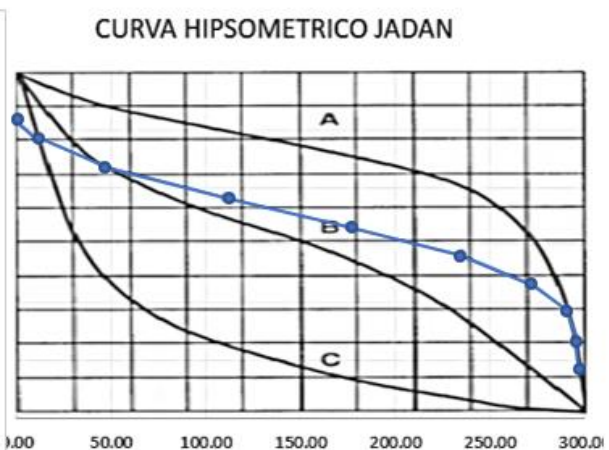
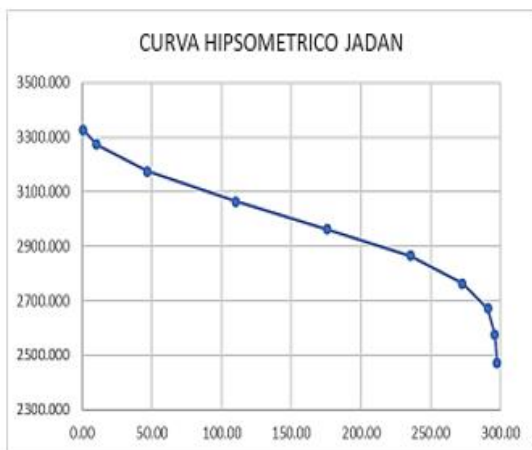
### Curvas hipsométricas

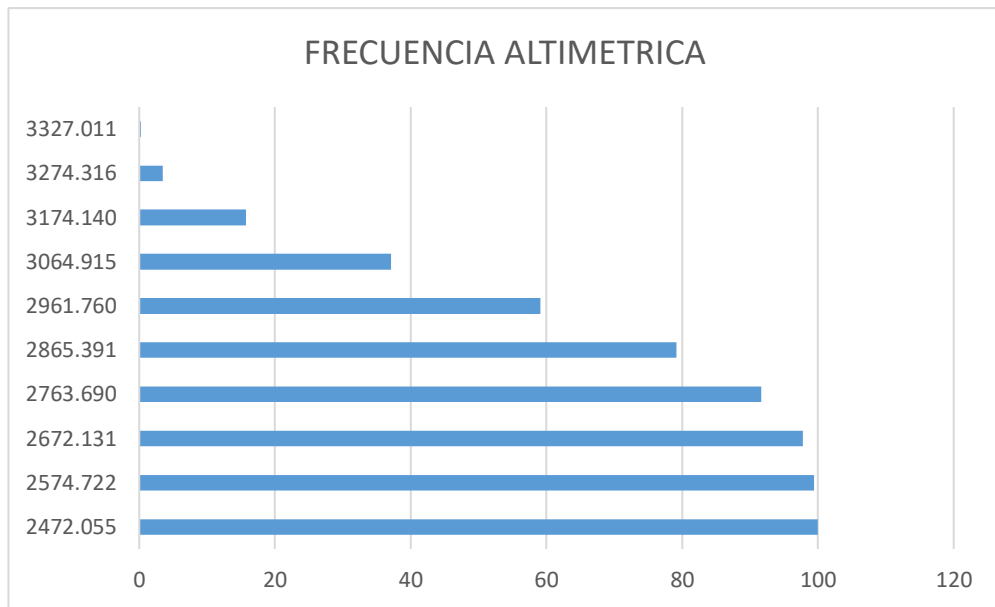
N. de orden	Cota mínima	Cota máxima	Áreas parciales (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	Área que queda sobre la superficie (km <sup>2</sup> )	Porcentaje de área entre C.N.	Porcentaje de área sobre C.N.
1	2231.721	2340.699463	6.44	6.44	120.29	5.354	100
2	2333.680	2471.749023	22.94	29.38	113.85	19.072	94.64555699
3	2460.260	2575.126953	24.41	53.79	90.91	20.289	75.57385268
4	2564.279	2673.561279	17.71	71.50	66.50	14.723	55.28456235
5	2658.577	2763.839111	11.03	82.53	48.79	9.166	40.56169501
6	2753.955	2865.310303	9.30	91.83	37.77	7.734	31.39524915
7	2858.257	2960.500732	8.39	100.22	28.46	6.975	23.66096711
8	2952.917	3060.937988	12.31	112.53	20.07	10.235	16.68602023
9	3055.133	3168.764404	5.80	118.33	7.76	4.821	6.450582166
10	3161.348	3243.181885	1.96	120.29	1.96	1.630	1.629985816
			120.29			100.000	



### Curva hipsométrica Jadan

<b>Curvas hipsométricas</b>							
<b>N. de orden</b>	<b>Cota mínima</b>	<b>Cota máxima</b>	<b>Áreas parciales (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área acumulada (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área que queda sobre la superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje de área entre C.N.</b>	<b>Porcentaje de área sobre C.N.</b>
1	2377.203	2472.055	1.60	1.60	297.52	0.539	100
2	2461.625	2574.722	5.13	6.74	295.92	1.725	99.4607
3	2562.753	2672.131	18.20	24.94	290.78	6.119	97.7353
4	2658.433	2763.690	37.20	62.14	272.58	12.504	91.6165
5	2751.563	2865.391	59.50	121.65	235.38	20.000	79.1126
6	2851.805	2961.760	65.55	187.20	175.87	22.033	59.1127
7	2951.839	3064.915	63.48	250.69	110.32	21.338	37.0796
8	3054.094	3174.140	36.47	287.16	46.83	12.259	15.7417
9	3157.942	3274.316	9.58	296.74	10.36	3.221	3.4832
10	3262.797	3327.011	0.78	297.52	0.78	0.262	0.2622
			297.52			100.000	

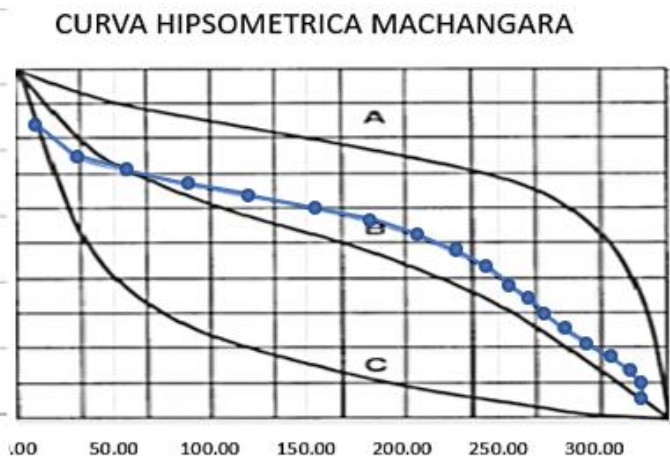
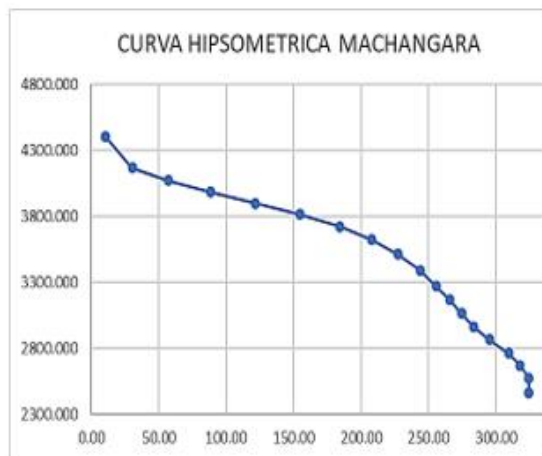


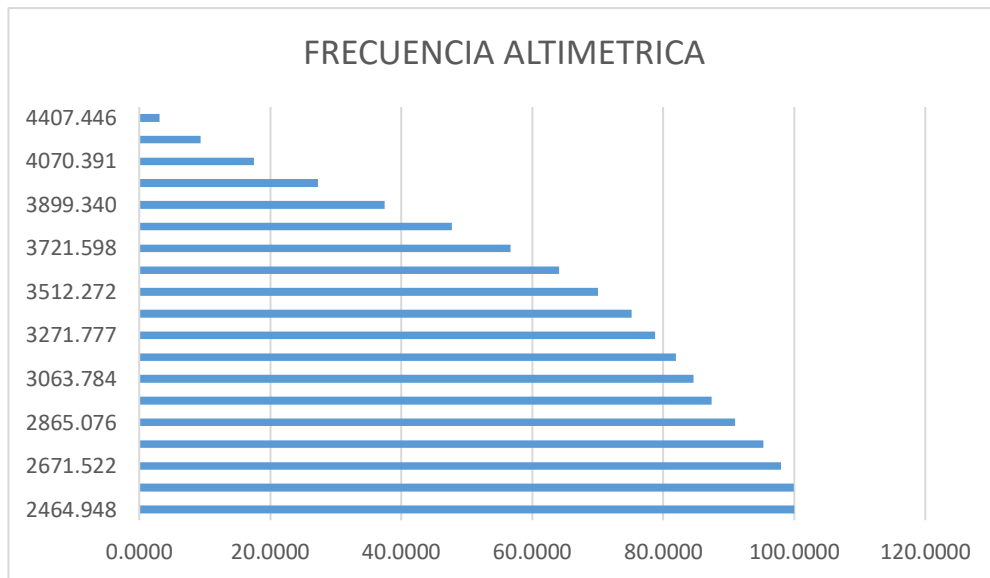


Curva hipsométrica Machángara

<b>Curvas hipsométricas</b>							
<b>N. de orden</b>	<b>Cota mínima</b>	<b>Cota máxima</b>	<b>Áreas parciales (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área acumulada (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área que queda sobre la superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje de área entre C.N.</b>	<b>Porcentaje de área sobre C.N.</b>
1	2449.952	2464.948	0.15	0.15	324.61	0.045	100.0000
2	2464.471	2571.879	6.49	6.64	324.46	2.000	99.9550
3	2563.406	2671.522	8.59	15.23	317.97	2.646	97.9552
4	2662.712	2761.980	13.99	29.21	309.38	4.309	95.3096

5	2754.956	2865.076	11.68	40.89	295.39	3.597	91.0006
6	2855.330	2960.319	9.09	49.98	283.72	2.800	87.4033
7	2952.257	3063.784	8.66	58.64	274.63	2.669	84.6035
8	3055.657	3168.677	10.37	69.01	265.96	3.194	81.9344
9	3158.123	3271.777	11.66	80.67	255.60	3.593	78.7404
10	3261.093	3392.649	16.67	97.35	243.93	5.137	75.1474
11	3378.825	3512.272	19.14	116.49	227.26	5.896	70.0108
12	3501.448	3624.220	24.04	140.53	208.12	7.406	64.1148
13	3611.921	3721.598	29.12	169.64	184.08	8.971	56.7092
14	3707.027	3814.415	33.41	203.05	154.96	10.291	47.7385
15	3801.161	3899.340	32.95	236.00	121.56	10.151	37.4471
16	3886.114	3984.536	31.69	267.69	88.61	9.762	27.2965
17	3972.732	4070.391	26.44	294.13	56.92	8.146	17.5347
18	4058.360	4168.602	20.34	314.47	30.48	6.266	9.3889
19	4153.511	4407.446	10.14	324.61	10.14	3.123	3.1231
			324.61			100.000	

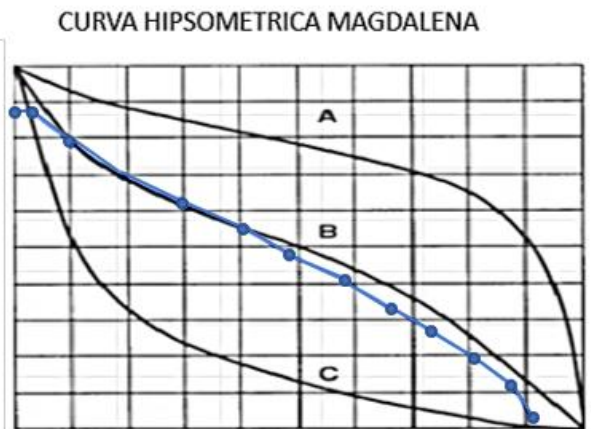
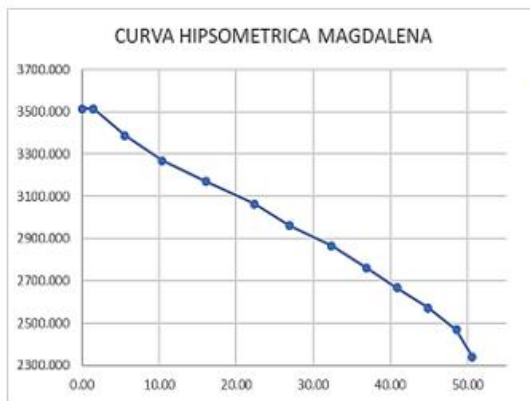


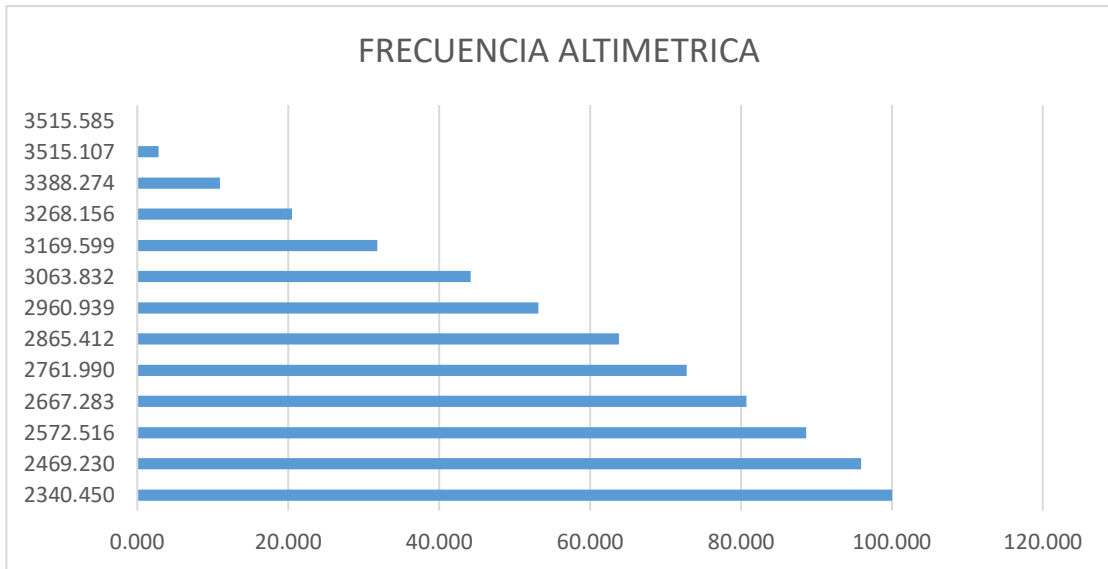


Curva hipsométrica Magdalena

<b>Curvas hipsométricas</b>							
<b>N. de orden</b>	<b>Cota mínima</b>	<b>Cota máxima</b>	<b>Áreas parciales (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área acumulada (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área que queda sobre la superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje de área entre C.N.</b>	<b>Porcentaje de área sobre C.N.</b>
1	2207.260	2340.450	2.05	2.05	50.61	4.056	100.000
2	2334.886	2469.230	3.68	5.73	48.55	7.267	95.944
3	2462.805	2572.516	4.01	9.74	44.88	7.921	88.678
4	2565.540	2667.283	4.02	13.76	40.87	7.950	80.757

5	2659.728	2761.990	4.53	18.29	36.85	8.945	72.807	
6	2754.071	2865.412	5.40	23.69	32.32	10.674	63.862	
7	2857.901	2960.939	4.55	28.24	26.92	8.999	53.189	
8	2951.955	3063.832	6.27	34.51	22.36	12.386	44.190	
9	3054.858	3169.599	5.71	40.22	16.09	11.287	31.804	
10	3156.891	3268.156	4.83	45.05	10.38	9.545	20.516	
11	3260.767	3388.274	4.11	49.17	5.55	8.125	10.972	
12	3382.103	3515.107	1.42	50.59	1.44	2.809	2.847	
13	3506.725	3515.585	0.02	50.61	0.02	0.037	0.037	
			50.61				100.000	



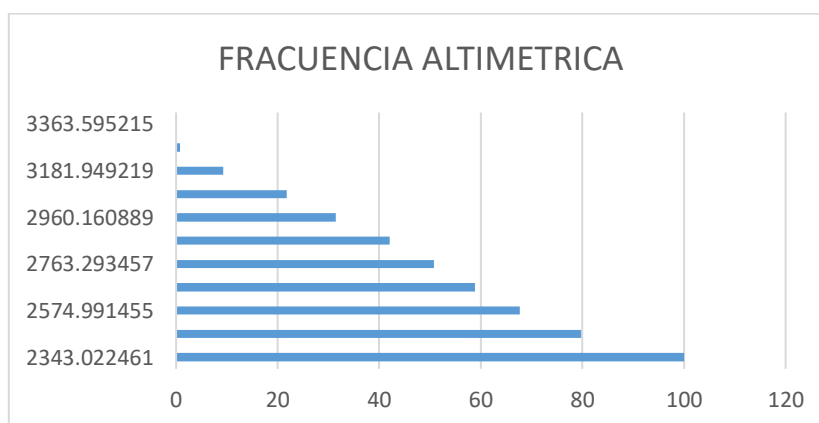
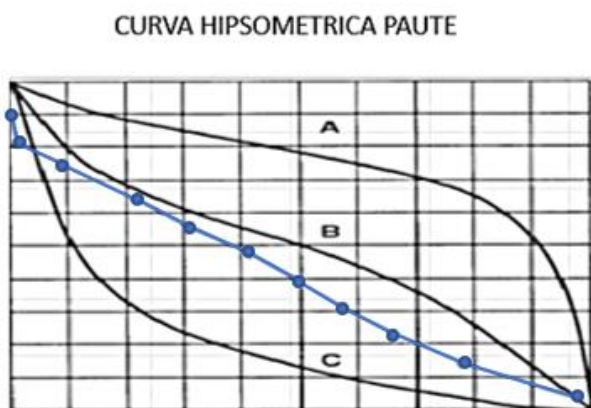
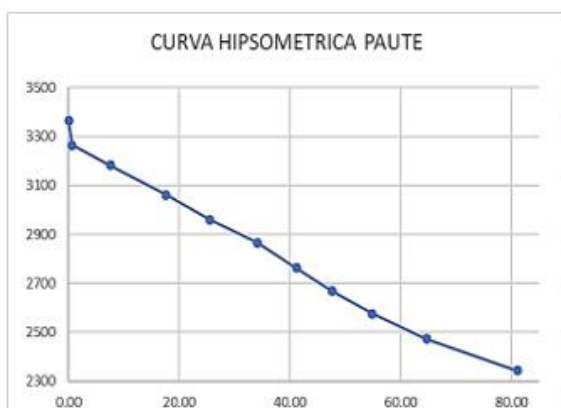


Curva hipsométrica Paute

#### Curvas hipsométricas

N. de orden	Cota mínima	Cota máxima	Áreas parciales (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	Área que queda sobre la superficie (km <sup>2</sup> )	Porcentaje de área entre C.N.	Porcentaje de área sobre C.N.
1	2199.006	2343.022461	16.42	16.42	81.06	20.260	100

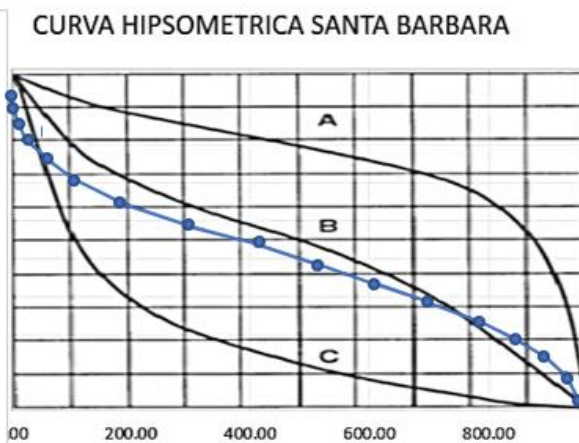
2	2332.283	2471.864502	9.77	26.19	64.63	12.053	79.74026174
3	2461.334	2574.991455	7.20	33.39	54.86	8.885	67.68770494
4	2564.003	2669.2229	6.48	39.87	47.66	7.993	58.80293704
5	2658.609	2763.293457	7.08	46.95	41.18	8.734	50.80953749
6	2754.000	2865.325928	8.62	55.58	34.10	10.640	42.07513017
7	2857.537	2960.160889	7.83	63.40	25.48	9.658	31.43480616
8	2952.285	3062.088867	10.09	73.49	17.65	12.443	21.77664515
9	3055.207	3181.949219	6.89	80.38	7.57	8.506	9.333729154
10	3159.733	3265.332764	0.65	81.04	0.67	0.806	0.827947019
11	3266.360	3363.595215	0.02	81.06	0.02	0.022	0.022168546
			81.06			100.000	

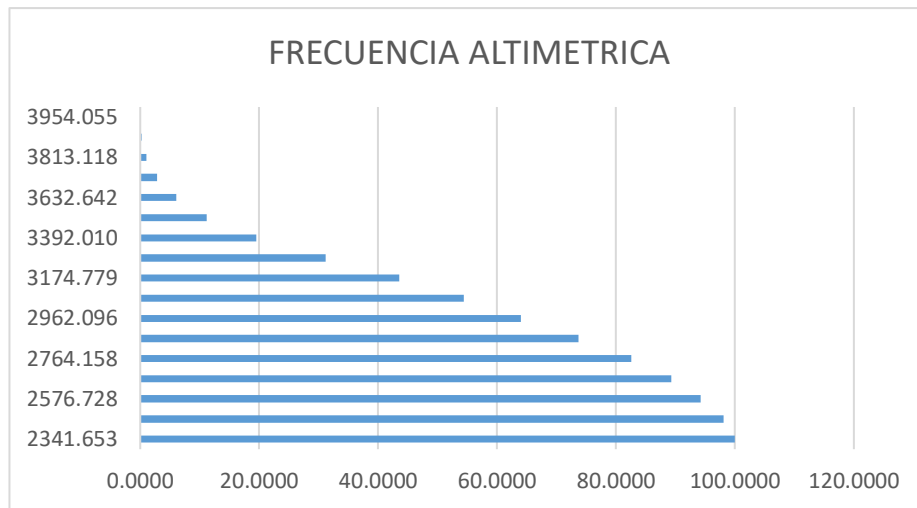


Curva hipsométrica Santa Barbara

**Curvas hipsométricas**

N. de orden	Cota mínima	Cota máxima	Áreas parciales (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	Área que queda sobre la superficie (km <sup>2</sup> )	Porcentaje de área entre C.N.	Porcentaje de área sobre C.N.
1	2234.226	2341.653	18.27	18.27	949.62	1.924	100.0000
2	2333.771	2474.001	36.23	54.50	931.35	3.815	98.0764
3	2461.996	2576.728	46.84	101.34	895.12	4.933	94.2611
4	2564.144	2671.793	64.30	165.64	848.27	6.771	89.3281
5	2657.621	2764.158	84.08	249.71	783.98	8.854	82.5574
6	2751.179	2868.047	92.25	341.96	699.90	9.715	73.7038
7	2853.262	2962.096	90.86	432.82	607.65	9.568	63.9891
8	2949.512	3066.013	103.53	536.35	516.80	10.902	54.4215
9	3051.755	3174.779	117.17	653.52	413.27	12.339	43.5194
10	3155.226	3273.736	110.37	763.89	296.09	11.623	31.1804
11	3259.690	3392.010	79.46	843.35	185.72	8.368	19.5578
12	3370.379	3513.193	49.01	892.36	106.26	5.161	11.1902
13	3499.312	3632.642	30.77	923.14	57.25	3.241	6.0290
14	3611.042	3722.979	16.29	939.42	26.48	1.715	2.7883
15	3706.464	3813.118	8.00	947.42	10.19	0.842	1.0734
16	3801.394	3897.924	2.04	949.46	2.19	0.214	0.2311
17	3890.017	3954.055	0.16	949.62	0.16	0.017	0.0166
			949.62			100.000	

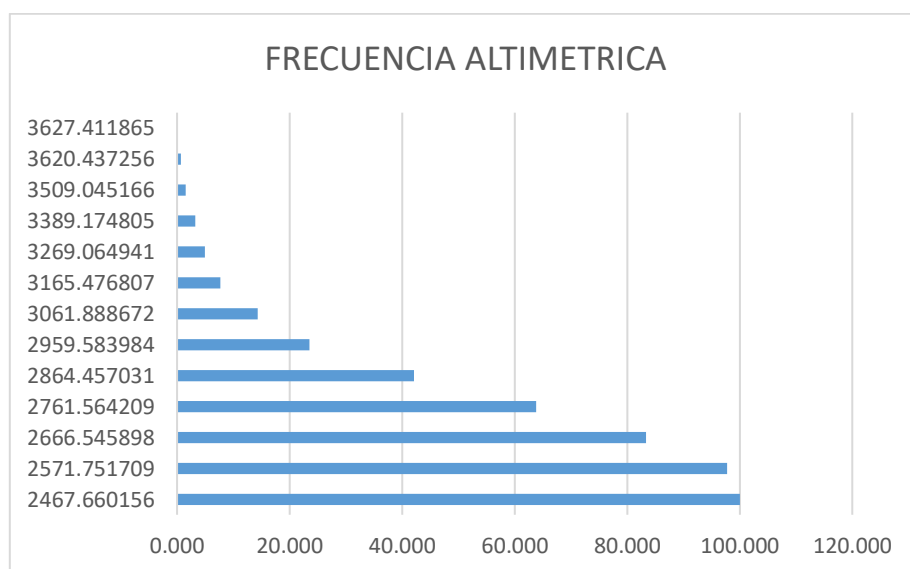
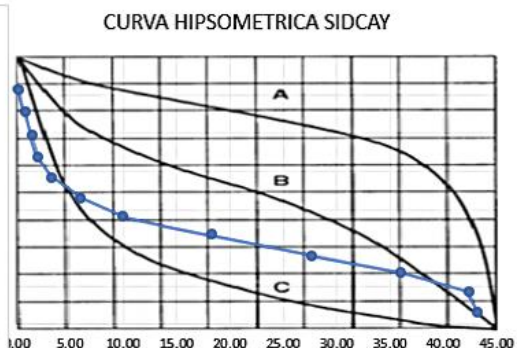
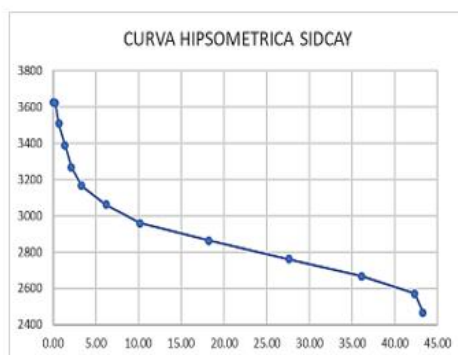




Curva hipsométrica Sidcay

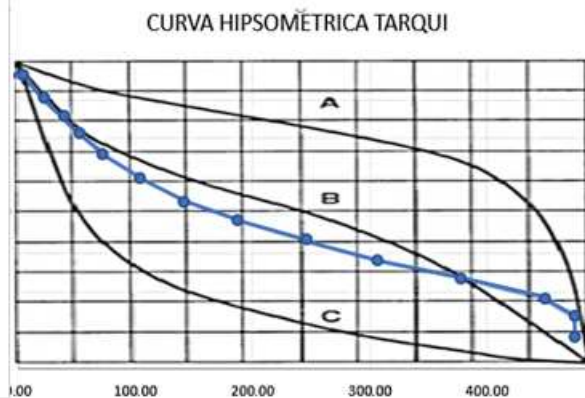
<b>Curvas hipsométricas</b>							
<b>N. de orden</b>	<b>Cota mínima</b>	<b>Cota máxima</b>	<b>Áreas parciales (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área acumulada (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área que queda sobre la superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje de área entre C.N.</b>	<b>Porcentaje de área sobre C.N.</b>
1	2407.834	2467.660	0.95	0.95	43.29	2.200	100.000
2	2464.468	2571.751	6.26	7.21	42.34	14.460	97.800

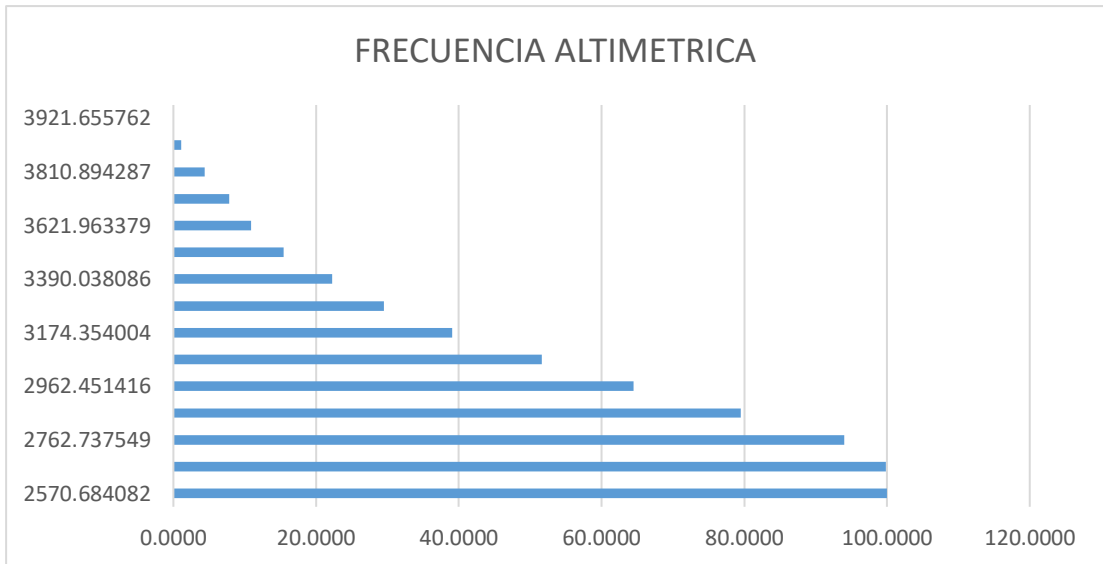
3	2566.036	2666.545	8.47	15.68	36.08	19.563	83.339
4	2661.867	2761.564	9.37	25.05	27.61	21.644	63.777
5	2756.180	2864.457	8.07	33.12	18.24	18.643	42.133
6	2859.593	2959.583	3.98	37.10	10.17	9.182	23.490
7	2954.744	3061.888	2.87	39.97	6.19	6.622	14.308
8	3060.05	3165.476	1.20	41.17	3.33	2.776	7.686
9	3163.669	3269.064	0.74	41.91	2.13	1.702	4.910
10	3266.19	3389.174	0.72	42.62	1.39	1.661	3.208
11	3388.028	3509.045	0.39	43.02	0.67	0.903	1.547
12	3507.09	3620.437	0.26	43.28	0.28	0.600	0.644
13	3619.8	3627.411	0.02	43.29	0.02	0.044	0.044
			43.29				100.000



### Curva hipsométrica Tarqui

Curvas hipsométricas							
N. de orden	Cota mínima	Cota máxima	Áreas parciales (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	Área que queda sobre la superficie (km <sup>2</sup> )	Porcentaje de área entre C.N.	Porcentaje de área sobre C.N.
1	2534.4555	2570.684	0.88	0.88	475.6	0.185	100.00
2	2565.5839	2668.892	27.53	28.41	474.7	5.788	99.814
3	2661.2199	2762.737	69.03	97.44	447.2	14.514	94.027
4	2750.5783	2865.756	71.51	168.95	378.1	15.035	79.512
5	2852.1960	2962.451	61.26	230.21	306.7	12.880	64.478
6	2951.4597	3064.376	59.63	289.84	245.4	12.537	51.597
7	3053.8491	3174.354	45.57	335.40	185.7	9.580	39.060
8	3155.3681	3271.262	34.49	369.90	140.2	7.253	29.480
9	3261.4584	3390.038	32.33	402.22	105.7	6.797	22.228
10	3378.6601	3509.987	21.50	423.73	73.39	4.521	15.431
11	3502.4414	3621.963	14.86	438.58	51.89	3.124	10.910
12	3614.2016	3719.918	16.17	454.76	37.03	3.400	7.7864
13	3709.5388	3810.894	15.60	470.36	20.86	3.280	4.3860
14	3803.0466	3894.526	5.21	475.56	5.26	1.095	1.1062
15	3891.3327	3921.655	0.05	475.62	0.05	0.011	0.0109
			475.62			100.00	

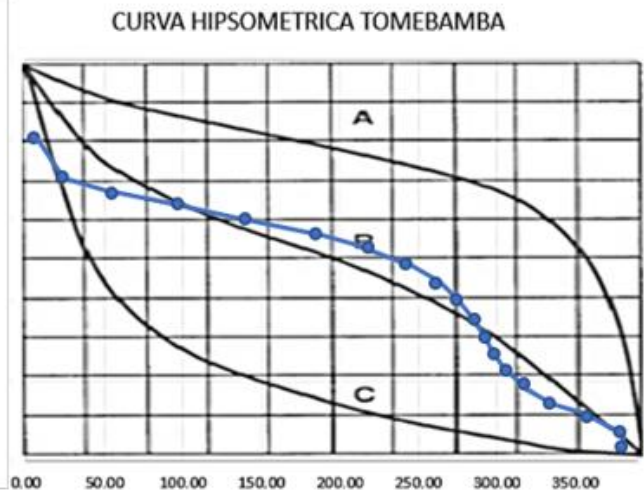


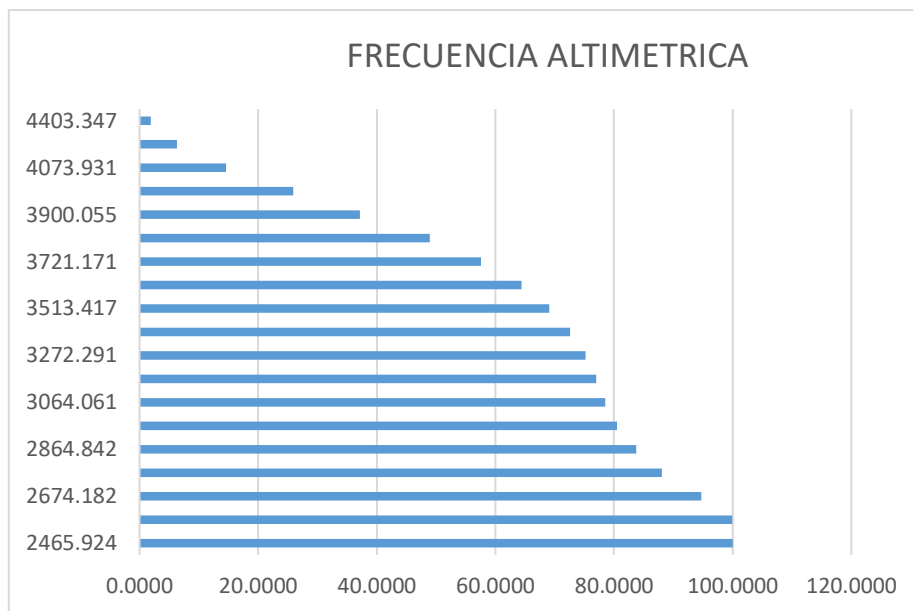


Curva hipsométrica Tomebamba

<b>Curvas hipsométricas</b>							
<b>N. de orden</b>	<b>Cota mínima</b>	<b>Cota máxima</b>	<b>Áreas parciales (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área acumulada (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área que queda sobre la superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje de área entre C.N.</b>	<b>Porcentaje de área sobre C.N.</b>
1	2453.193	2465.924	0.27	0.27	380.02	0.070	100.0000
2	2464.451	2573.291	19.80	20.06	379.75	5.209	99.9296
3	2563.394	2674.182	25.48	45.55	359.95	6.706	94.7201

4	2662.592	2760.252	16.12	61.67	334.47	4.242	88.0140
5	2753.100	2864.842	12.44	74.11	318.35	3.273	83.7718
6	2853.745	2961.233	7.38	81.49	305.91	1.943	80.4988
7	2949.635	3064.061	6.06	87.55	298.52	1.595	78.5555
8	3051.866	3167.779	6.77	94.32	292.46	1.781	76.9610
9	3154.966	3272.291	9.78	104.10	285.70	2.573	75.1798
10	3259.020	3393.982	13.30	117.40	275.92	3.499	72.6069
11	3378.054	3513.417	18.04	135.43	262.62	4.747	69.1078
12	3498.389	3625.343	25.68	161.12	244.58	6.758	64.3608
13	3610.599	3721.171	32.96	194.07	218.90	8.673	57.6031
14	3704.075	3815.354	44.61	238.68	185.94	11.739	48.9302
15	3798.367	3900.055	42.83	281.52	141.33	11.272	37.1908
16	3885.363	3986.870	42.95	324.47	98.50	11.303	25.9192
17	3971.606	4073.931	31.58	356.05	55.54	8.310	14.6158
18	4056.497	4164.581	16.64	372.69	23.96	4.379	6.3062
19	4154.416	4403.347	7.33	380.02	7.33	1.928	1.9276
			380.1			100.000	

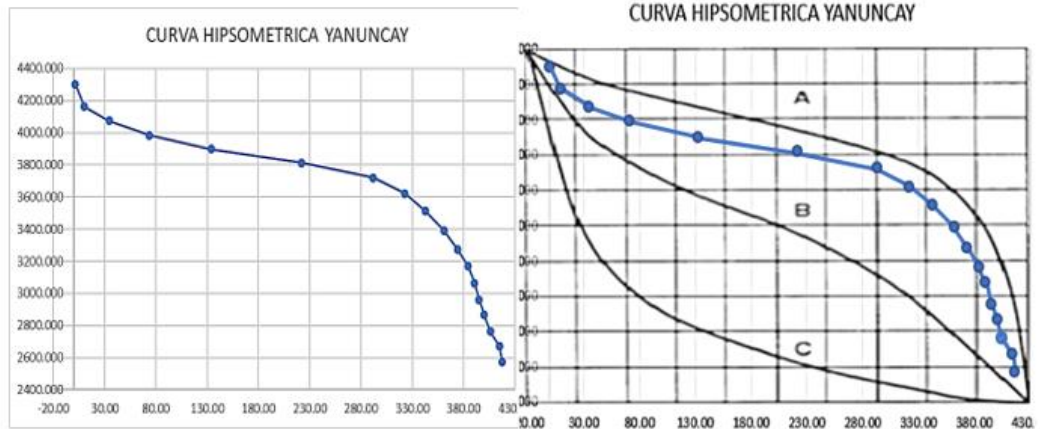


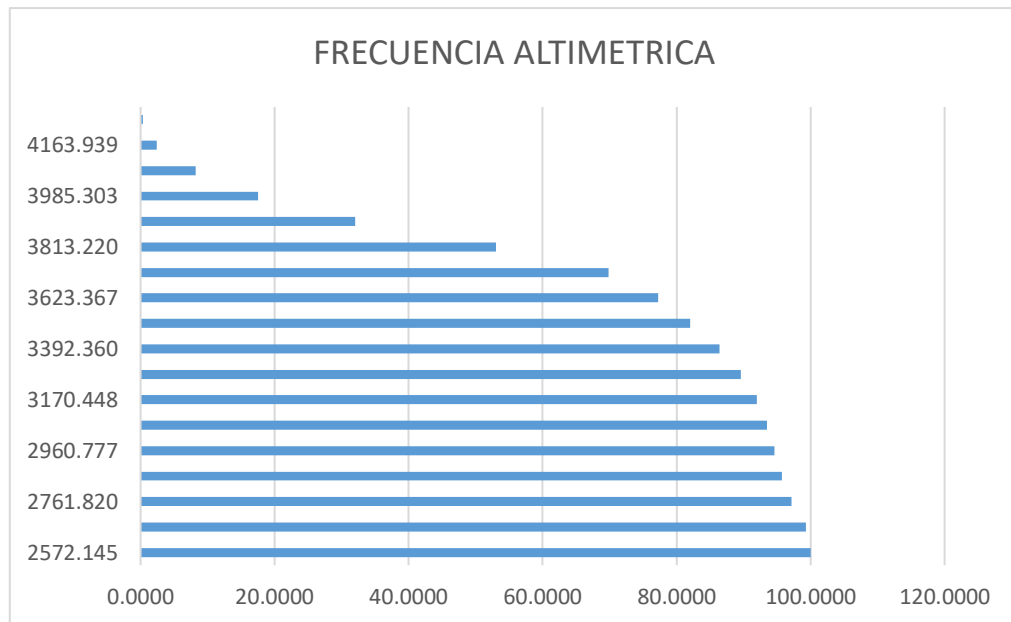


Curva hipsométrica Yanuncay

N. de orden	Cota mínima	Cota máxima	Áreas parciales (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	Área que queda sobre la superficie (km <sup>2</sup> )	Porcentaje de área entre C.N.	Porcentaje de área sobre C.N.
1	2507.774	2572.145	2.95	2.95	417.83	0.705	100.0000
2	2564.078	2671.671	8.85	11.80	414.89	2.119	99.2951
3	2662.413	2761.820	6.05	17.84	406.03	1.447	97.1762
4	2753.764	2864.516	4.84	22.69	399.99	1.159	95.7294
5	2853.755	2960.777	4.48	27.17	395.14	1.072	94.5702
6	2951.475	3064.804	6.33	33.50	390.66	1.516	93.4980
7	3051.636	3170.448	9.95	43.45	384.33	2.381	91.9824

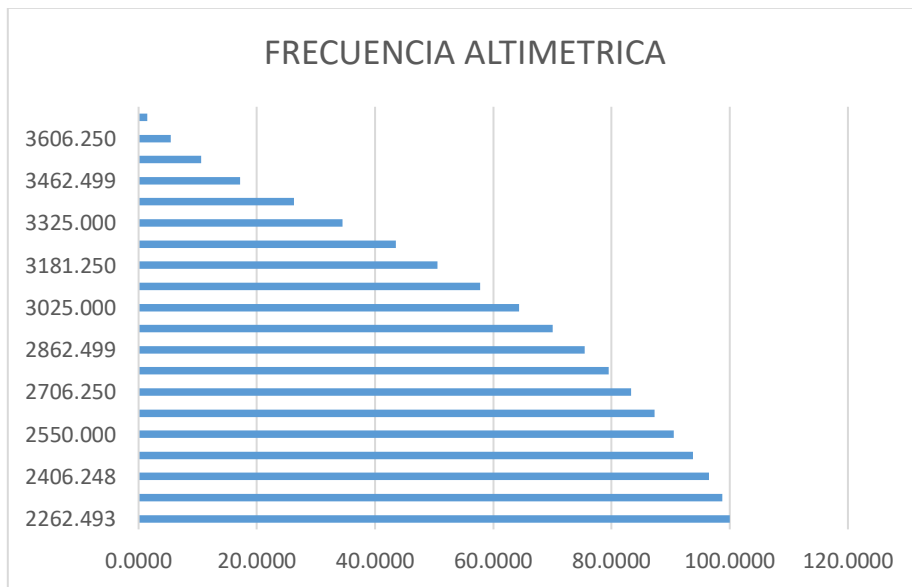
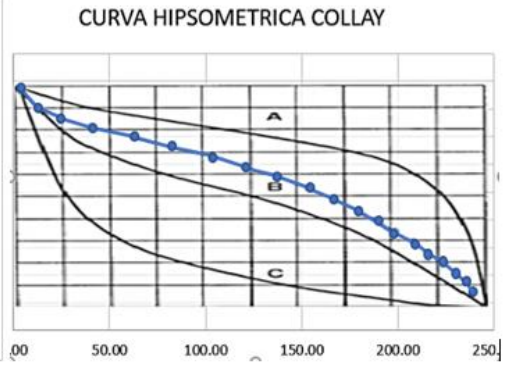
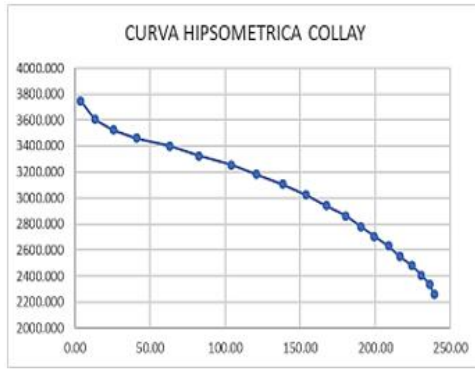
8	3156.618	3271.536	13.52	56.97	374.38	3.236	89.6014
9	3259.498	3392.360	18.00	74.97	360.86	4.308	86.3653
10	3379.502	3512.080	20.08	95.05	342.86	4.806	82.0570
11	3500.238	3623.367	30.91	125.96	322.78	7.397	77.2514
12	3611.743	3721.137	70.26	196.22	291.87	16.815	69.8547
13	3706.267	3813.220	87.87	284.08	221.62	21.029	53.0396
14	3800.927	3898.398	60.53	344.61	133.75	14.486	32.0104
15	3887.199	3985.303	39.01	383.62	73.22	9.336	17.5243
16	3973.599	4075.295	24.13	407.75	34.21	5.775	8.1879
17	4059.526	4163.939	8.68	416.43	10.08	2.078	2.4124
18	4153.794	4303.792	1.40	417.83	1.40	0.334	0.3344
			417.83			100.000	





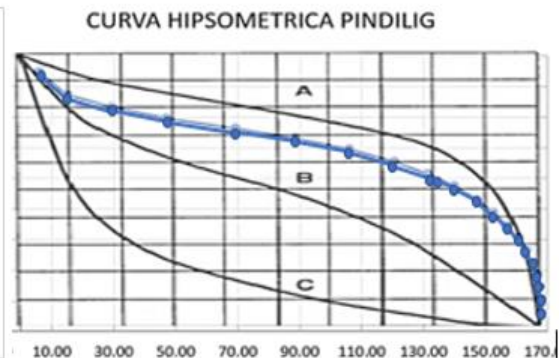
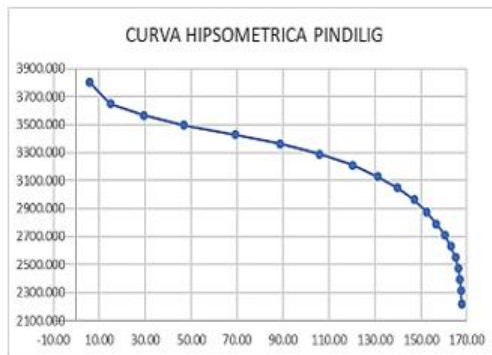
Curva hipsométrica Collay

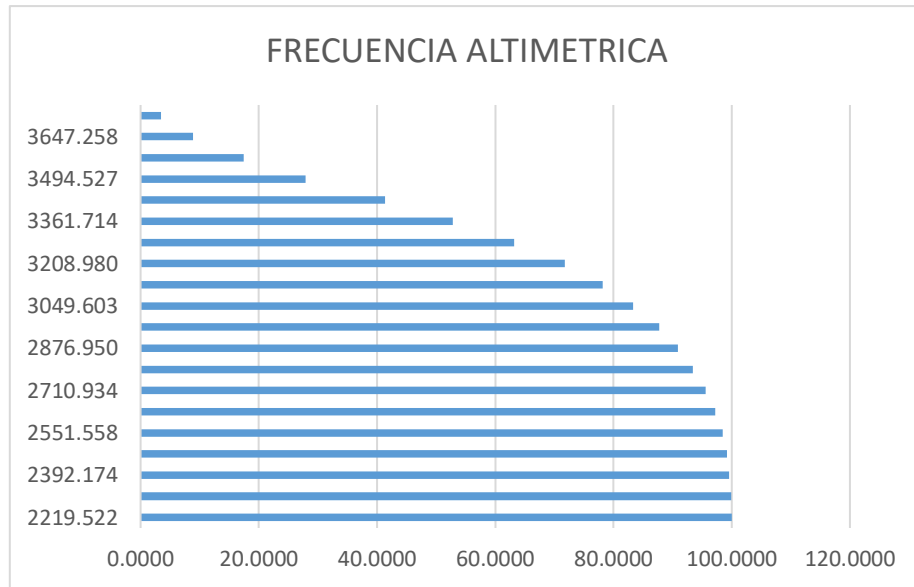
<b>N. de orden</b>	<b>Cota mínima</b>	<b>Cota máxima</b>	<b>Áreas parciales (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área acumulada (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área que queda sobre la superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje de área entre C.N.</b>	<b>Porcentaje de área sobre C.N.</b>
1	2150.000	2262.493	3.09	3.09	239.07	1.293	100.0000
2	2262.507	2337.498	5.35	8.44	235.98	2.238	98.7068
3	2337.500	2406.248	6.37	14.81	230.63	2.665	96.4689
4	2406.252	2481.240	7.83	22.64	224.26	3.273	93.8037
5	2481.250	2550.000	7.81	30.45	216.43	3.269	90.5305
6	2550.001	2631.248	9.44	39.89	208.62	3.948	87.2618
7	2631.252	2706.250	9.04	48.93	199.18	3.782	83.3138
8	2706.251	2781.248	9.80	58.73	190.14	4.098	79.5321
9	2781.252	2862.499	12.94	71.67	180.34	5.413	75.4345
10	2862.501	2943.747	13.48	85.15	167.40	5.638	70.0214
11	2943.751	3025.000	15.78	100.93	153.92	6.600	64.3830
12	3025.000	3106.250	17.26	118.19	138.14	7.222	57.7834
13	3106.250	3181.250	16.79	134.98	120.88	7.022	50.5619
14	3181.251	3256.250	21.67	156.65	104.09	9.065	43.5395
15	3256.250	3325.000	19.59	176.24	82.42	8.192	34.4742
16	3325.000	3400.000	21.86	198.10	62.83	9.144	26.2818
17	3400.000	3462.499	15.62	213.72	40.97	6.536	17.1381
18	3462.501	3525.000	12.26	225.98	25.35	5.129	10.6025
19	3525.000	3606.250	9.54	235.52	13.09	3.989	5.4739
20	3606.250	3750.000	3.55	239.07	3.55	1.485	1.4846
			239.07			100.000	



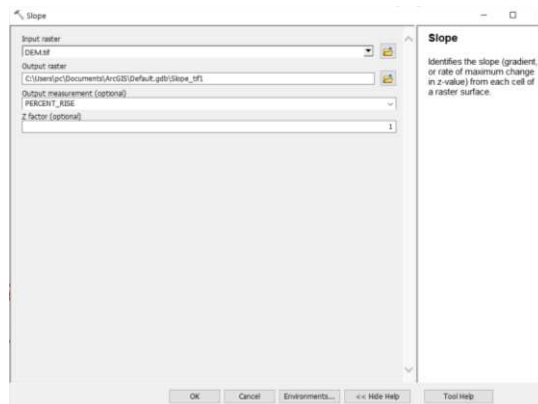
### Curva hipsométrica Pindilig

N. de orden	Cota mínima	Cota máxima	Áreas parciales (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	Área que queda sobre la superficie (km <sup>2</sup> )	Porcentaje de área entre C.N.	Porcentaje de área sobre C.N.
1	2100.000	2219.522	0.208	0.208	167.73	0.124	100.0000
2	2219.564	2312.498	0.509	0.717	167.52	0.303	99.8758
3	2312.542	2392.174	0.686	1.404	167.01	0.409	99.5723
4	2392.207	2471.868	1.188	2.591	166.32	0.708	99.1632
5	2471.894	2551.558	2.097	4.688	165.13	1.250	98.4551
6	2551.589	2631.246	2.664	7.353	163.04	1.588	97.2048
7	2631.250	2710.934	3.740	11.092	160.37	2.230	95.6163
8	2710.936	2790.620	4.237	15.329	156.63	2.526	93.3866
9	2790.625	2876.950	5.286	20.615	152.40	3.151	90.8606
10	2876.955	2963.278	7.300	27.914	147.11	4.352	87.7093
11	2963.280	3049.603	8.667	36.581	139.81	5.167	83.3572
12	3049.608	3129.289	10.776	47.358	131.14	6.425	78.1899
13	3129.294	3208.980	14.438	61.796	120.37	8.608	71.7649
14	3208.981	3288.667	17.282	79.078	105.93	10.304	63.1567
15	3288.669	3361.714	19.320	98.398	88.65	11.519	52.8530
16	3361.716	3428.121	22.442	120.840	69.33	13.380	41.3342
17	3428.122	3494.527	17.634	138.474	46.89	10.514	27.9540
18	3494.528	3567.573	14.340	152.814	29.25	8.550	17.4402
19	3567.575	3647.258	9.091	161.905	14.91	5.420	8.8904
20	3647.261	3799.995	5.821	167.726	5.82	3.470	3.4705
			167.73			100.000	

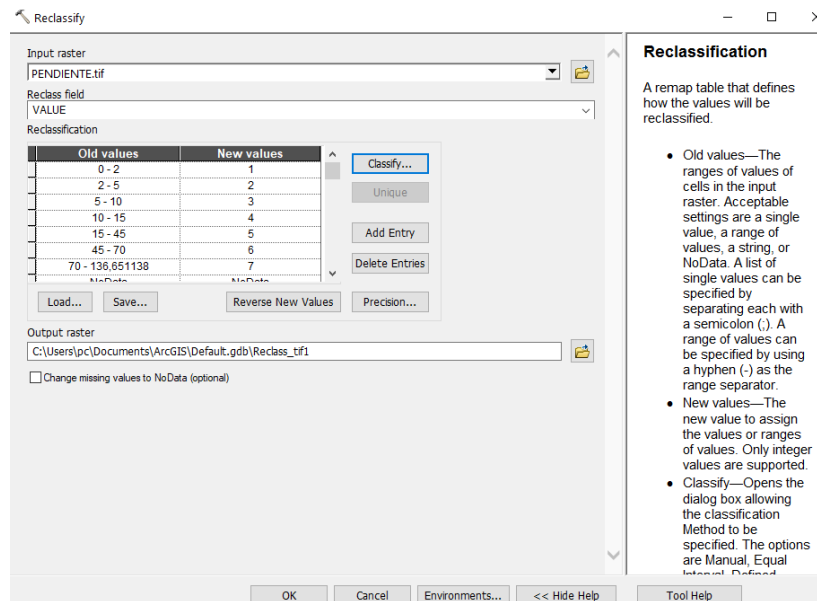




### Herramienta para crear el mapa de pendientes

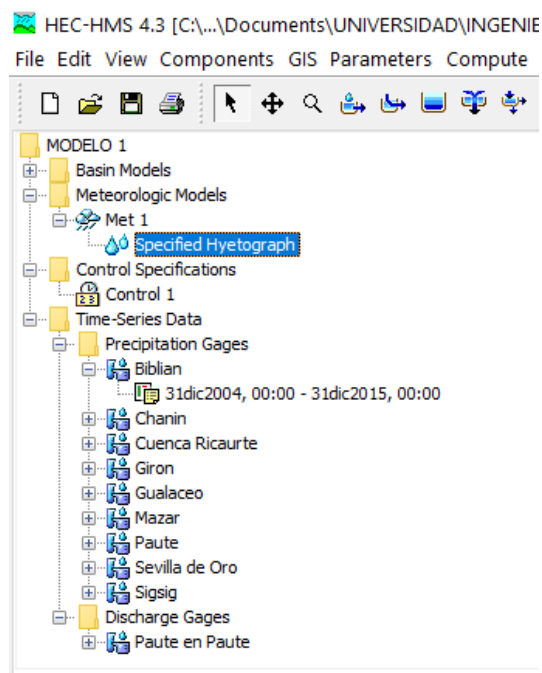


Luego de esto se realizo una reclasificacion de acuerdo a la clasificacion obtenida en el apartado teorico.



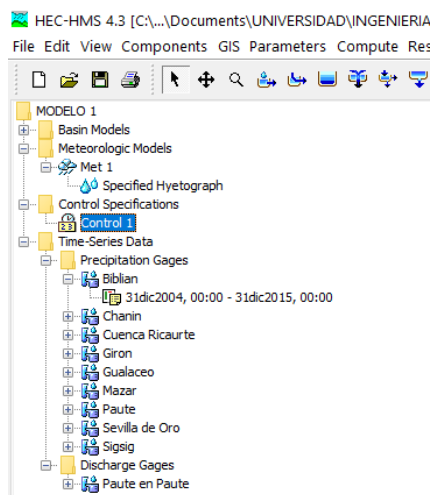
## HEC-HMS

### Especificacion hidrológicas



Specified Hyetograph	
Met Name: Met 1	
Subbasin Name	Gage
BURGAY	Biblian
COLLAY	Sevilla de Oro
CUENCA	Gualaceo
JADAN	Sigsig
MACHANGARA	Cuenca Ricaurte
MAGDALENA	Chanin
PAUTE	Paute
PINDILIG	Mazar
SANTA BARBARA	Sigsig
SIDCAY	Cuenca Ricaurte
TARQUI	Giron
TOMBAMBA	Cuenca Ricaurte
YANUNCAY	Giron

## Tiempo de control



**Control Specifications**

**Name: Control 1**

Description:

\*Start Date (ddMMYYYY) 31dic2004

\*Start Time (HH:mm) 00:00

\*End Date (ddMMYYYY) 31dic2015

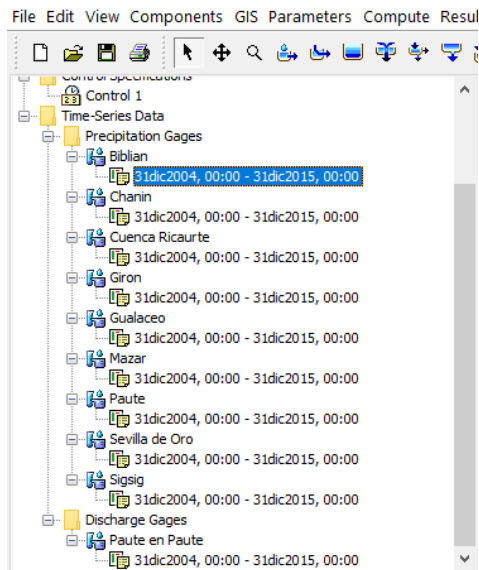
\*End Time (HH:mm) 00:00

Time Interval: 1 Day

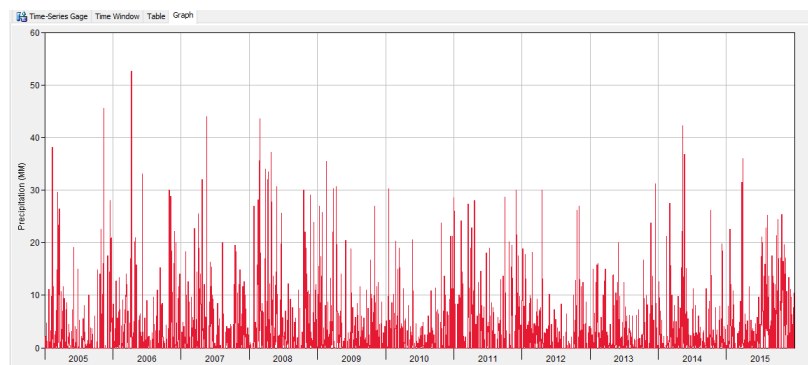
Grid Interval: 1 Day

Grid Time Shift (HR) 0

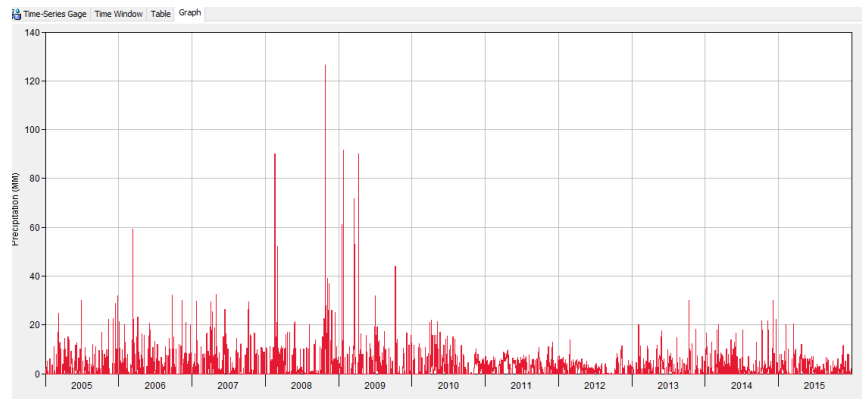
## Precipitacion y caudales



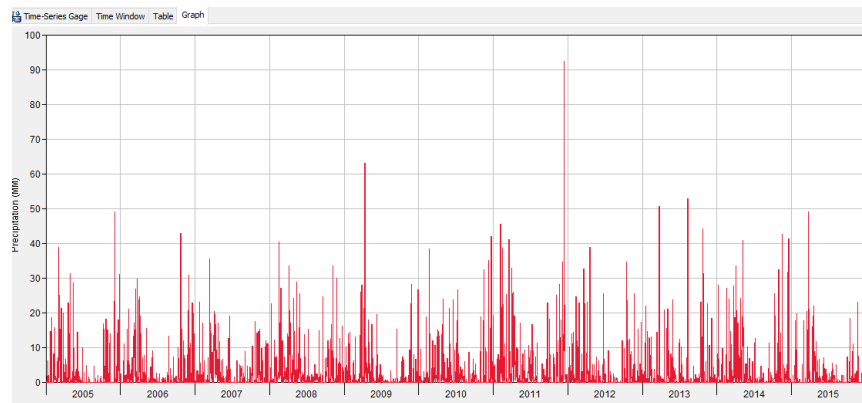
## Biblián



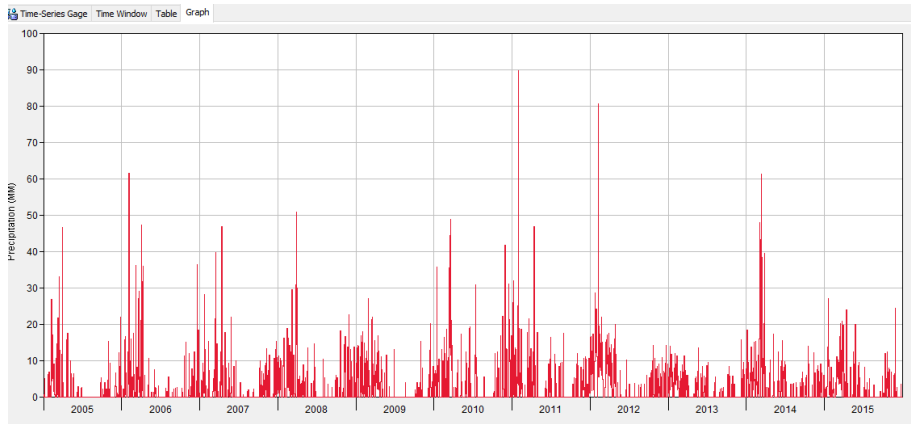
## Chanin



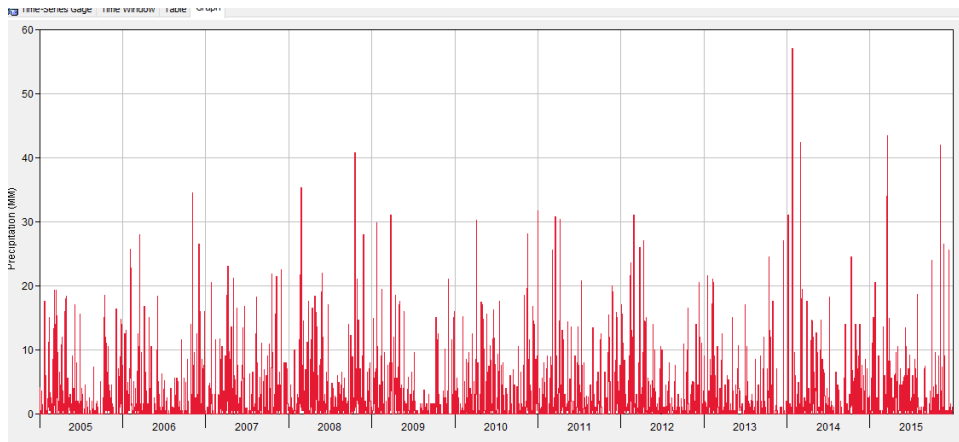
## Cuenca Ricaurte



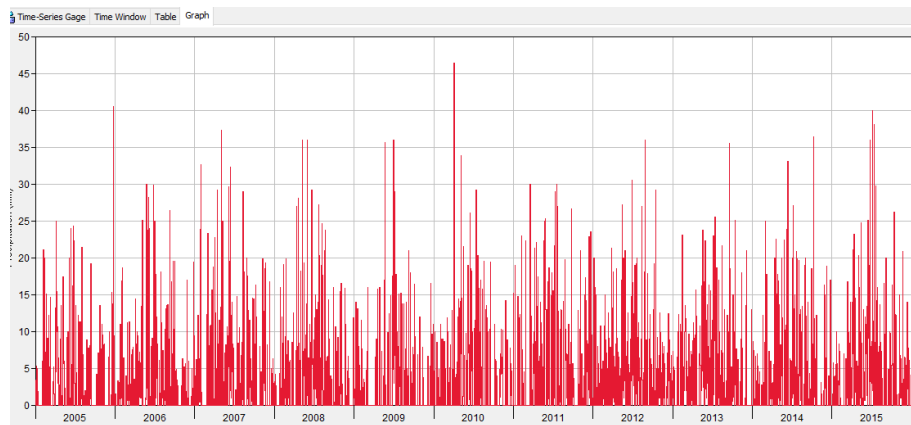
## Girón



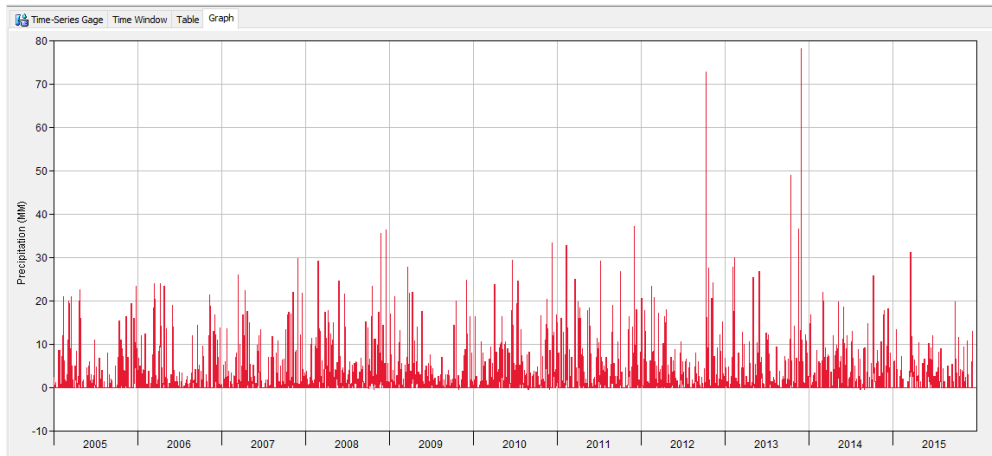
Gualaceo



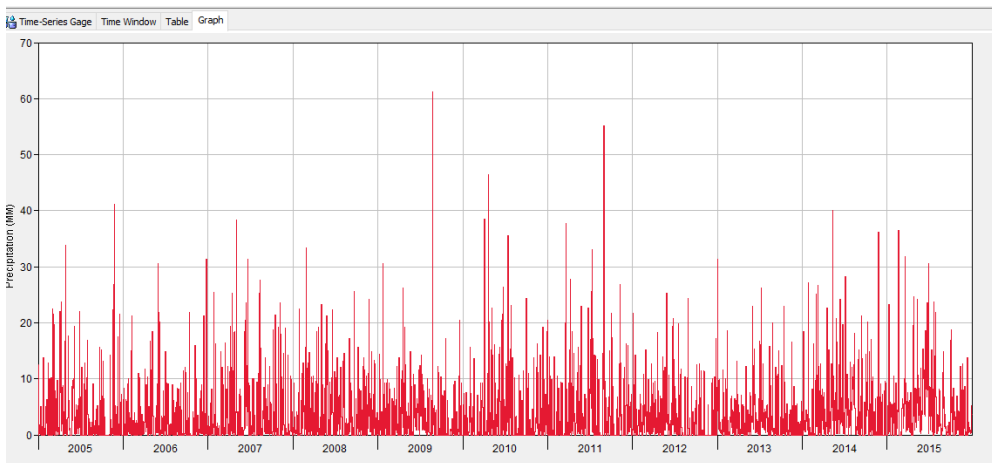
Mazar



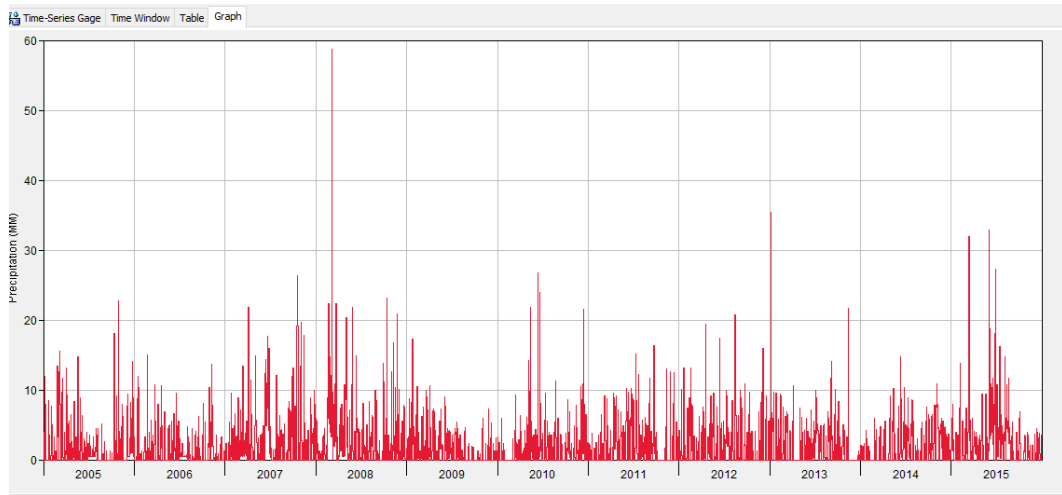
## Paute



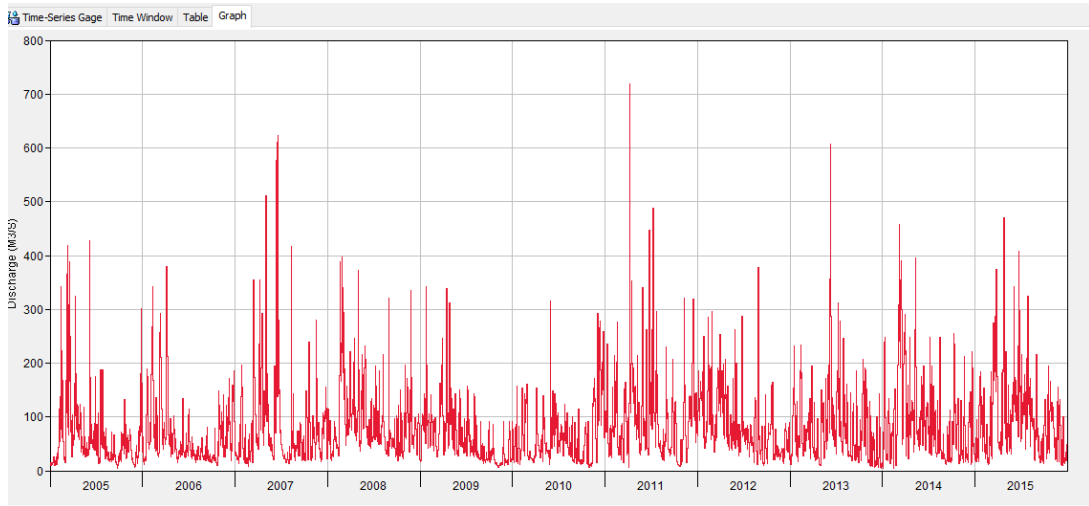
## Sevilla de oro



## Sigsig



### Caudal Paute en paute



## AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Nosotros, **Theilor Jhicson Suquilanda Ramon** y **José Ignacio Tacuri Jaramillo** portadores de la cédula de ciudadanía N.º **1104852981** y **0106744204**. En calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA EN LOS EMBALSES DE MAZAR Y AMALUZA EN LA PROVINCIA DEL AZUAY-ECUADOR”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizamos a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 05 de agosto de 2021



Theilor Jhicson Suquilanda Ramón  
1104852981



José Ignacio Tacuri Jaramillo  
0106744204