

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE CIVIL



DISERTACIÓN DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

TEMA: “DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DIGITAL
INTEGRADO DE ALERTA TEMPRANA PARA CRECIDAS PARA LA
CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN JOSÉ DE MINAS”

AUTOR:

KENNY JOSSUÉ PABÓN CEVALLOS

QUITO, 2022

RESUMEN

La presente investigación contiene el diseño de un sistema automático digital integrado de alerta temprana para crecidas para la central hidroeléctrica San José de Minas. La presente tesis pretende incorporar al sistema SCADA una alerta temprana mediante el control de precipitaciones y caudales, mismos que permitan predecir hidrogramas de crecidas y obtener información en tiempo real para alertar a la población ante un evento extraordinario y poner en marcha un plan de emergencia establecido con anterioridad.

Dentro del presente trabajo se distinguen cuatro partes principales: En la primera (capítulos 1 y 2) se incluyen aspectos teóricos de las ciencias que fundamentan este trabajo, aquí se describen los aspectos hidrológicos de una cuenca hidrográfica, se explica la hidráulica de ríos y canales y se revisa aspectos teóricos de las centrales hidroeléctricas. Adicionalmente se trata acerca del software libre HEC y su aplicación en la hidráulica e hidrología. También se realiza una revisión del funcionamiento de un sistema de alerta temprana para crecidas, todo esto consecuencia de una exhaustiva investigación bibliográfica.

En la segunda parte (capítulo 3) se presenta la información básica del lugar del proyecto. De la información disponible de un estudio hidrológico contratado por la empresa Hidroeléctrica San José de Minas S.A. se muestra la hidrología y se estiman los caudales máximos de la zona de estudio. Mediante el uso de ArcGIS se obtienen los parámetros morfométricos de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi, así como también las propiedades de sus redes hídricas. Toda esta información es necesaria para la modelación en el software HEC.

La tercer parte (capítulo 4) consiste en la realización del modelo de las cuencas hidrográficas en el software HEC. Primero se construye el modelo hidrológico en HEC-HMS y se obtienen los hidrogramas de salida y los caudales máximos generados. Esta información se emplea en el modelo hidráulico realizado en HEC-RAS y se determinan las zonas de inundación en las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi. Una vez analizados los modelos se define una sección tipo para el sistema de alerta temprana y se establecen los puntos de control. Luego, se explica el funcionamiento del Sistema de Alerta Temprana propuesto y se elabora un presupuesto estimativo de su instalación.

Finalmente, en la quinta parte (capitulo 5) de la investigación se presentan las conclusiones y recomendaciones.

ABSTRACT

The current research contains the design of an integrated digital automatic early warning system for floods for the San José de Minas hydroelectric plant. This thesis intends to incorporate into the SCADA system an early warning through the control of rainfall and flows, predicting hydrographs of floods and obtaining information in real time to alert the population to an extraordinary event and launch an established emergency plan.

Within the present work four main parts are distinguished: The first one (Chapters 1 and 2) Contains theoretical aspects of the sciences that support this work, The reader will find concepts of hydrological aspects of a hydrographic basin, the hydraulics of rivers and canals and theoretical aspects of hydroelectric power plants. Additionally, software HEC and its application in hydraulics and hydrology are explained. A review of the operation of an early warning system for floods is also included, all this as a result of an exhaustive bibliographical research.

The second part (chapter 3) has all the information about the project on study. From the information available from a hydrological study contracted by the company “Hidroeléctrica San José de Minas S.A.” the hydrology is shown, and the maximum flows of the study area are estimated. Using ArcGIS, the morphometric parameters of the Perlabi and Cubi river basins are obtained, as well as the properties of their water networks. All this information is necessary for modeling the basins in HEC.

The third part (chapter 4) consists of the realization of the model of the hydrographic basins in the HEC software. First, the hydrological model is built in HEC-HMS and the outlet hydrographs and the maximum flows generated are obtained. This information is used in the hydraulic model made in HEC-RAS to determine the flood zones in the Perlabi and Cubi river basins. Once the models have been analyzed, a standard section for the early warning system is defined and the control points are established. Then, the operation of the proposed Early Warning System is explained and an estimated budget for its installation is prepared.

Finally, in the fifth part (chapter 5) will find the conclusions and recommendations of the current research

TABLA DE CONTENIDOS

1.	CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1	Planteamiento del problema.....	1
1.2	Justificación	1
1.3	Objetivos	2
1.3.1	Objetivo General:	2
1.3.2	Objetivos Específicos:	2
1.4	Alcance.....	3
2.	CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	4
2.1	Aspectos Generales.....	4
2.1.1	Matriz Energética del Ecuador	4
2.1.2	Clima del área del proyecto	4
2.2	Aspectos hidrológicos.....	5
2.2.1	Cuenca hidrográfica.....	5
2.2.1.1	Componentes de una cuenca hidrográfica:.....	6
2.2.1.2	Delimitación de una cuenca hidrográfica.....	6
2.2.2	Características físicas de una cuenca hidrográfica	6
2.2.2.1	Perímetro de la cuenca	6
2.2.2.2	Área de drenaje.....	7
2.2.2.3	Forma de la cuenca.....	7
2.2.2.3.1	Coefficiente de Gravilias o Compacidad (Kc)	7
2.2.2.3.2	Factor de forma (Kf)	8
2.2.2.3.3	Relación de circularidad.....	8
2.2.2.3.4	Relación de elongación	9
2.2.2.4	Sistema de drenaje.....	9
2.2.2.4.1	Orden de las corrientes de agua	9
2.2.2.4.2	Densidad de drenaje	10
2.2.2.4.3	Extensión media de la escorrentía.....	10
2.2.2.4.4	Sinuosidad de las corrientes de agua.....	10
2.2.2.4.5	Pendiente de la cuenca	11
2.2.2.4.6	Tiempo de concentración	11
2.2.3	Características hidrológicas de la cuenca	11
2.2.3.1	Precipitación.....	11
2.2.3.2	Permeabilidad.....	12

2.2.3.3	Escorrentía superficial.....	12
2.3	Centrales hidroeléctricas	12
2.3.1	Definición	12
2.3.2	Funcionamiento de una central hidroeléctrica.....	12
2.3.3	Componentes de una central hidroeléctrica.....	13
2.3.3.1	Captación.....	13
2.3.3.2	Azud de derivación.....	14
2.3.3.3	Toma lateral.....	14
2.3.3.4	Desarenador.....	14
2.3.3.5	Conducción.....	15
2.3.3.6	Canal.....	15
2.3.3.7	Tanque de presión	15
2.3.3.8	Compuertas.....	16
2.3.3.9	Tubería de presión	16
2.3.3.10	Válvulas.....	16
2.3.3.11	Casa de máquinas	16
2.3.3.12	Turbinas.....	16
2.3.3.13	Turbinas Pelton	16
2.4	Hidráulica de ríos y canales	17
2.4.1	Generalidades sobre ríos.....	17
2.4.2	Aspectos de hidráulica fluvial	18
2.4.2.1	Modelo bifásico.....	18
2.4.2.2	Movilidad fluvial.....	19
2.4.2.3	Geometría Hidráulica	21
2.4.3	Canales	22
2.4.3.1	Tipos de canales	22
2.4.3.2	Tipos de flujo en canales.....	23
2.4.3.3	Estados de flujo en canales.....	24
2.4.3.4	Principios básicos de la hidráulica del flujo no permanente	25
2.5	Sistemas de Alerta Temprana	28
2.5.1.1	Definición.....	28
2.5.1.2	Sistema de Alerta Temprana para inundaciones	29
2.5.1.3	Componentes de un Sistema de Alerta Temprana	29
2.5.1.4	Conocimiento y vigilancia permanente del peligro en tiempo real.....	29

2.5.1.5	Seguimiento con respaldo técnico e institucional	30
2.5.1.6	Difusión y comunicación	30
2.5.1.7	Capacidad de respuesta	30
2.5.1.8	Funcionamiento de un Sistema de Alerta Temprana	31
2.5.2	Clasificación de los Sistemas de Alerta Temprana	32
2.5.2.1	Sistemas automatizados.....	32
2.5.2.2	Sistema comunitario.....	33
2.6	Descripción del programa HEC-HMS	33
2.6.1	Generalidades	33
2.6.2	Componentes.....	34
2.6.2.1	Modelo de cuenca.....	34
2.6.2.2	Modelo meteorológico	34
2.6.2.3	Especificaciones de control.....	34
2.6.3	Datos de entrada.....	34
2.7	Características del programa HEC-RAS.....	35
2.7.1	Generalidades	35
2.7.1.1	Perfiles de Superficie de flujos de agua constante.	35
2.7.1.2	Simulación de flujo inestable.....	36
2.7.1.3	Transporte de sedimentos.....	36
2.7.1.4	Análisis de la calidad de agua.	36
2.7.2	Datos necesarios para la simulación en HEC-RAS.....	36
2.7.2.1	Datos Geométricos	37
2.7.2.2	Datos de flujo permanente.....	37
2.7.2.3	Datos de flujo no permanente.....	40
2.7.2.4	Datos del módulo control	41
2.7.3	Métodos de cálculo.....	41
3.	CAPÍTULO III: MODELACIÓN DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA...	42
3.1	Estudios básicos e información del proyecto.....	42
3.1.1	Ubicación	42
3.1.2	Topografía	42
3.1.2.1	Cartas del Instituto Geográfico Militar	42
3.1.2.2	Plano topográfico de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi.....	43
3.1.3	Hidrología.....	43
3.1.3.1	Datos de estación hidrométrica	43

3.1.3.1.1	Análisis de lluvias	44
3.1.3.1.2	Curva de Intensidad Duración Frecuencia (IDF).....	46
3.1.3.2	Caudal Máximo	48
3.1.3.2.1	Determinación de caudales máximos probables	48
3.1.3.2.2	Análisis de crecidas.....	51
3.1.3.3	Caudal medio.....	55
3.1.3.4	Estimación del caudal ecológico	55
3.1.4	Meteorología	55
3.1.4.1	Temperatura	56
3.1.4.2	Humedad relativa	57
3.1.4.3	Vientos	58
3.1.4.4	Evaporación.....	58
3.2	Información básica para la simulación hidrológica	60
3.2.1	Delimitación hidrográfica de las cuencas.....	60
3.2.2	Parámetros geomorfológicos de las cuencas en estudio.....	62
3.2.2.1	Dirección de flujo.....	63
3.2.2.2	Acumulación de flujo	64
3.2.2.3	Redes irregulares de triángulos (TIN).....	64
3.2.2.4	Curva Hipsométrica.....	65
3.2.2.5	Pendiente	69
3.2.3	Propiedades de la red hídrica	71
3.2.3.1	Longitud del curso principal	71
3.2.3.2	Orden la red hídrica.....	72
3.2.4	Número de curva (CN).....	77
3.2.4.1	Uso del suelo	78
4.	CAPÍTULO IV: MODELACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN JOSÉ DE MINAS CON HEC	83
4.1	Programas HEC	83
4.1.1	Módulo de hidrología HEC-HMS	83
4.1.2	Módulo de hidráulica HEC-RAS	83
4.2	Simulación hidrológica e hidráulica	83
4.2.1	Generalidades	83
4.2.2	Ingreso de datos hidrológicos.....	83
4.2.3	Ingreso de datos hidráulicos	95
4.2.4	Resultados HEC-RAS	100

4.2.4.1	Visualización de resultados.....	100
4.2.4.2	Análisis y discusión de resultados.....	101
4.2.4.3	Simulación de sección tipo en función del caudal	105
4.2.5	Sistema de Alerta Temprano propuesto	112
4.2.5.1	Descripción del Sistema de Alerta Temprana.....	112
4.2.5.2	Puntos de control.....	112
4.2.5.3	Medios de comunicación.....	115
4.2.5.4	Acciones preventivas y tiempo de alerta.....	115
4.2.5.5	Costos de implementación, operación y mantenimiento del sistema de alerta temprana	118
5.	CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	120
5.1	Conclusiones.....	120
5.2	Recomendaciones	122
	BIBLIOGRAFÍA.....	123

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Valores interpretativos del Factor de forma.....	8
Tabla 2.	Tipos de alerta en un SAT.....	30
Tabla 3.	Corrección en la determinación del coeficiente "n" de Manning.....	40
Tabla 4.	Estaciones meteorológicas seleccionadas.....	43
Tabla 5.	Lluvias mensuales periodo 1962-2013.....	44
Tabla 6.	Lluvias máximas diarias.....	46
Tabla 7.	Patrón del aguacero 2015	48
Tabla 8.	Caudales medios mensuales (m ³ /s) turbinados en la central Perlabi.....	48
Tabla 9.	Síntesis de caudales mensuales periodo 1965-2013 m ³ /s.....	49
Tabla 10.	Caudales medios aprovechables Cubi +Perlabi m ³ /s.....	50
Tabla 11.	Caudales mensuales probables Cubi + Perlabi m ³ /s.....	50
Tabla 12.	Cálculo de caudales de crecida Método HUSCS Distribución Chicago.....	52
Tabla 13.	Caudales de crecida hidrograma triangular.....	53
Tabla 14.	Resumen caudales de crecidas.....	54
Tabla 15.	Temperatura media mensuales °C.....	56
Tabla 16.	Humedad relativa %	57
Tabla 17.	Velocidad del viento media mensual (m/s).....	58
Tabla 18.	Evaporación tanque, media mensual (mm).....	58
Tabla 19.	Resultados curva hipsométrica de la cuenca del río Perlabi.....	66
Tabla 20.	Resultados curva hipsométrica de la cuenca del río Cubi.....	68
Tabla 21.	Rangos de pendientes de la cuenca del río Perlabi.....	70
Tabla 22.	Rangos de pendientes de la cuenca del río Cubi.....	71
Tabla 23.	Resumen de los parámetros morfométricos de la cuenca del río Perlabi.....	73
Tabla 24.	Resumen de los parámetros morfométricos de la cuenca del río Cubi.....	74

Tabla 25. Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Perlabi.....	75
Tabla 26. Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca del río Perlabi	76
Tabla 27. Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Cubi	76
Tabla 28. Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca del río Cubi.....	77
Tabla 29. Cálculo de CN(II), CN(III) y CN(I) en función de HSG y uso del suelo de la cuenca del río Perlabi.	81
Tabla 30. Cálculo de CN(II), CN(III) y CN(I) en función de HSG y uso del suelo de la cuenca del río Cubi.	81
Tabla 31. Resumen caudales de crecida en m ³ /s obtenidos de HEC-HMS.....	95
Tabla 32. Coordenadas de estaciones SAT Perlabi	113
Tabla 33. Coordenadas de estaciones SAT Cubi.....	114
Tabla 34. Presupuesto Referencial de instalación de un SAT.....	118
Tabla 35. Presupuesto referencial de operación y mantenimiento anual del SAT	119

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Perfil pluvial cuencas ríos Cubi y Perlabi	45
Gráfico 2. Histograma de lluvias medias mensuales.....	45
Gráfico 3. Patrón envolvente del aguacero.....	47
Gráfico 4. Patrón del aguacero Estación San José de Minas.....	47
Gráfico 5. Hietograma TR 100 años río Cubi	53
Gráfico 6. Hidrograma de crecidas TR 100 años río Cubi en la toma	54
Gráfico 7. Temperaturas medias mensuales	56
Gráfico 8. Perfil térmico zona de estudio	57
Gráfico 9. Curva Hipsométrica de la cuenca del río Perlabi	67
Gráfico 10. Curva Hipsométrica de la cuenca del río Cubi.....	69
Gráfico 11. Hidrograma de crecidas-TR 50 años- Río Cubi.....	90
Gráfico 12. Hidrograma de crecidas-TR 100 años- Río Cubi	91
Gráfico 13. Hidrograma de crecidas-TR 500 años- Río Cubi	92
Gráfico 14. Hidrogramas de crecidas río Cubi	92
Gráfico 15. Hidrograma de crecidas-TR 50 años- Río Perlabi	93
Gráfico 16. Hidrograma de crecidas-TR 100 años- Río Perlabi.....	93
Gráfico 17. Hidrograma de crecidas-TR 500 años- Río Perlabi.....	94
Gráfico 18. Hidrogramas de crecidas río Perlabi	94

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Orden de las corrientes de agua.....	9
Ilustración 2. Esquema de una central hidroeléctrica	13
Ilustración 3. Malla Coanda.....	14
Ilustración 4. Elementos de un desarenador	15
Ilustración 5. Esquema Turbinas Pelton	17
Ilustración 6. Meandros	20

Ilustración 7. Relación entre pendiente y caudal según expresión de Lane	21
Ilustración 8. Canal natural (Río)	22
Ilustración 9. Canal artificial (Canal de conducción en una central hidroeléctrica).....	23
Ilustración 10. Flujo en canales abiertos	24
Ilustración 11. Continuidad de flujo no permanente	26
Ilustración 12. Energía en flujo no permanente.....	26
Ilustración 13. Esquema de balance masa, continuidad, y balance de fuerzas para ecuaciones de Saint Venant	27
Ilustración 14. Ubicación geográfica de la casa de máquinas de la central Hidroeléctrica San José de Minas	42
Ilustración 15. Distribución temporal de temperatura estación Inguincho 2013.....	59
Ilustración 16. Distribución temporal de precipitación estación Inguincho 2013.....	60
Ilustración 17. Área de estudio seleccionada en Google Earth	60
Ilustración 18. Modelo DEM en Global Mapper de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi.	61
Ilustración 19. Delimitación de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS	62
Ilustración 20. Codificación de dirección de flujo en ArcGIS	63
Ilustración 21. Dirección de flujo de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS	63
Ilustración 22. Acumulación de flujo de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS	64
Ilustración 23. Modelo TIN de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS	65
Ilustración 24. Curvas de nivel de la cuenca del río Perlabi en ArcGIS	66
Ilustración 25. Curvas de nivel de la cuenca del río Cubi en ArcGIS.....	68
Ilustración 26. Pendientes de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS	70
Ilustración 27. Longitud de los cursos de agua de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS.....	72
Ilustración 28. Orden de las redes hídricas de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS.....	73
Ilustración 29. Zonificación de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en función del uso del suelo en ArcGIS	79
Ilustración 30. Zonificación de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en función del grupo hidrológico del suelo en ArcGIS	80
Ilustración 31. Creación de nuevo proyecto en HEC-HMS	84
Ilustración 32. Creación de Basin Model	84
Ilustración 33. Definición del sistema de coordenadas HEC-HMS	85
Ilustración 34. Creación del terreno en HEC-HMS.....	85
Ilustración 35. Modelo DEM en HEC-HMS	86
Ilustración 36. Modelo de la cuenca con la herramienta GIS de HEC-HMS.....	86
Ilustración 37. Delimitación de las subcuencas en HEC-HMS	87
Ilustración 38. Modelo de la cuenca del río Perlabi en HEC-HMS	87
Ilustración 39. Modelo de la cuenca del río Cubi en HEC-HMS	87
Ilustración 40. Ajuste métodos de cálculo en HEC-HMS.....	88
Ilustración 41. Ingreso de datos pluviométricos HEC-HMS.....	89
Ilustración 42. Modelo meteorológico HEC-HMS	89
Ilustración 43. Especificaciones de control HEC-HMS	90
Ilustración 44. Crear nuevo proyecto en HEC-RAS	95
Ilustración 45. Herramienta RAS Mapper.....	96

Ilustración 46. Modelo DEM en HEC-RAS	97
Ilustración 47. Ingreso de Curva Número en HEC-RAS	97
Ilustración 48. Condiciones de flujo no permanente en HEC-RAS	98
Ilustración 49. Análisis de flujo no permanente	99
Ilustración 50. Simulación finalizada HEC-RAS	99
Ilustración 51. Cuenca del río Perlabi en HEC-RAS	100
Ilustración 52. Cuenca del río Cubi en HEC-RAS	100
Ilustración 53. Zona de inundación río Perlabi.....	101
Ilustración 54. Volumen acumulado zona de inundación río Perlabi.....	102
Ilustración 55. Velocidad máxima zona de inundación río Perlabi.....	102
Ilustración 56. Zona de inundación río Cubi	103
Ilustración 57. Volumen acumulado zona de inundación cuenca río Cubi	104
Ilustración 58. Velocidad máxima zona de inundación río Cubi	104
Ilustración 59. Canal río Perlabi	105
Ilustración 60. Canal río Cubi.....	105
Ilustración 61. Perfil topográfico río Perlabi	106
Ilustración 62. Esquema del canal del río Perlabi	107
Ilustración 63. Sección del canal río Perlabi	107
Ilustración 64. Datos de flujo permanente.....	108
Ilustración 65. Análisis de flujo permanente HEC-RAS.....	108
Ilustración 66. Resultados HEC-RAS canal río Perlabi	109
Ilustración 67. Resumen resultados canal río Perlabi en HEC-RAS.....	109
Ilustración 68. Perfil topográfico río Cubi	110
Ilustración 69. Resultados HEC-RAS canal río Cubi.....	111
Ilustración 70. Resumen resultados canal río Cubi en HEC-RAS	111
Ilustración 71. Esquema SAT cuenca del río Perlabi	113
Ilustración 72. Esquema SAT cuenca del río Perlabi	114
Ilustración 73. Hidrogramas de crecidas río Cubi	117
Ilustración 74. Hidrogramas de crecidas río Perlabi	117

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Los fenómenos naturales catastróficos originados por factores hidrometeorológicos tienen gran incidencia en el territorio nacional, generando estragos en la infraestructura y en el desarrollo social. De acuerdo con EPN-La Red-IAI (2004) señala que, en el Ecuador, los desastres están ligados a la inestabilidad del clima y que durante los últimos 30 años los desastres hidrometeorológicos se incrementaron del 15,8% al 67,1%, entre ellos las inundaciones.

Es importante determinar la capacidad de respuesta real de la Central Hidroeléctrica San José De Minas para enfrentar los fenómenos climáticos, así como estudiar la red hidrometeorológica de la zona para poder establecer los parámetros de precipitación, caudales, crecidas de las cuencas hidrográficas y modelar un sistema de alerta temprana acorde a las necesidades. Este sistema de alerta temprana es de suma importancia pues preservará la integridad de la infraestructura y permitirá la oportuna toma de decisiones ante eventuales siniestros en la zona.

La aplicación de software libre HEC es una herramienta útil en el área de hidráulica e hidrología, puesto permite realizar una correcta modelación, un diseño adecuado y comprobación de resultados de las obras hidráulicas a estudiarse.

1.2 Justificación

En la provincia de Pichincha, parroquia San José de Minas del Distrito Metropolitano de Quito en la localidad Alcane y Archiquela se encuentra la Central Hidroeléctrica San José De Minas, una central de aproximadamente 6MW de potencia instalada que recibe las aguas de los ríos Perlabi y Cubi por lo que es importante garantizar que los eventos hidro climáticos extremos en las microcuencas de los ríos Perlabi y Cubi no afecten la producción de la energía e infraestructura.

Un Sistema de Alerta Temprana (SAT) tiene como objetivo fundamental proporcionar predicciones oportunas y fiables con relación a eventos extremos de origen hidrometeorológico que afectan a la región, por lo que contribuye al desarrollo técnico,

económico y social de las poblaciones aledañas a la Central Hidroeléctrica San José De Minas.

La modelación hidráulica e hidrológica con el empleo de programas computacionales representan herramientas útiles para este estudio. Al presente, se cuenta con acceso libre proporcionada por entidades públicas como el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) en donde se encuentra el registro de las estaciones pluviográficas, además se dispone de características geológicas, climatológicas, físico geográficas y planimetrías lo que permite tener un enfoque claro para la determinación de los caudales para el correcto modelamiento del Sistema de Alerta Temprana por medio de la aplicación de programas de acceso libre como HEC HMS, FLOW MASTER y HEC RAS.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General:

- Diseñar un sistema automático digital integrado de alerta temprana mediante software computacional utilizando modelos hidrológicos e hidráulicos para la central hidroeléctrica San José de Minas.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Estudiar las características físicas e hidrológicas de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi, así como las variables hidrometeorológicas e hidráulicas para definir la información necesaria en la simulación con el software computacional HEC.
- Determinar los caudales máximos probables y el tránsito de crecidas mediante el uso de modelos hidrológicos e hidráulicos para diseñar una sección tipo del sistema de alerta temprana.
- Emplear el software computacional HEC para realizar una simulación hidrológica e hidráulica de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi que permita diseñar un sistema de alerta temprana para la central hidroeléctrica San José de Minas.

1.4 Alcance

Modelar un Sistema de Alerta Temprana para la central hidroeléctrica San José de Minas mediante software computacional libre HEC-RAS empleando la información hidráulica e hidrológica de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi. Este sistema empleará equipos automáticos digitales integrados entre ellos y formará parte del sistema SCADA de la central hidroeléctrica San José de Minas. Para ello será necesario caracterizar ambas cuencas, así como obtener la información de las estaciones hidrométricas y meteorológicas cercanas a través de la base de datos del INAMHI. Por otro lado, la empresa Hidroeléctrica San José de Minas S.A. proporcionará los caudales de generación desde el 26 junio del 2020 en adelante. Se presentará un presupuesto estimativo en donde se contemplan los costos de implementación, operación y mantenimiento del sistema de alerta temprana.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Aspectos Generales

2.1.1 Matriz Energética del Ecuador

El Ecuador tiene una economía relativamente pequeña, altamente dependiente de los ingresos del petróleo desde hace 50 años, en los últimos años representó entre el 14% y el 20% del PIB y entre el 20% y 30% de los ingresos públicos. Con el objetivo de lograr la transición a una nueva Matriz Energética y diversificar la economía, se ha brindado apoyo a la generación de electricidad mediante energías renovables para abaratar costes y así poder abastecer la mayor cantidad de la demanda con energías no contaminantes. Esto ha llevado al país a utilizar uno de los recursos más disponibles e importantes en el territorio, el agua; y construir numerosos proyectos de generación de energía hidráulica.

La privilegiada ubicación geográfica del Ecuador le permite gozar de una abundancia de recursos naturales, entre ellos los Recursos Hídricos que debido a la gran cantidad de cuencas de drenaje posee un potencial teórico de 74.000 MW. Así, han sido las hidroeléctricas los principales proyectos realizados ya que obtienen energía de una fuente renovable y sumamente abundante como es el agua. Sin embargo, debido a factores climáticos muchas de estas hidroeléctricas no han podido desarrollar su potencial completo y su operación no ha sido óptima, por lo que también es necesario contar con sistemas de alerta que permiten preservar la integridad de la infraestructura y garanticen su correcto funcionamiento (Atlas Ecuador, 2016).

2.1.2 Clima del área del proyecto

La república del Ecuador se ubica en la costa noroeste del océano Pacífico, limitando al norte con Colombia, y tanto al sur como al este con Perú. Se localiza en una zona intertropical que posee cuatro regiones naturales definidas por sus características geográficas, topográficas, hidrográficas y clima, estas son: costa, sierra, oriente y región insular. Tanto las corrientes marinas como la presencia de las cordilleras, Occidental, Central y Oriental que se extienden en sentido norte-sur, son condiciones geográficas que inciden de manera relevante en el clima del Ecuador.

El clima varía en relación con la altitud y las regiones que tiene el Ecuador, sin embargo, son predominantes dos estaciones climáticas: invierno que se desarrolla de diciembre a mayo

influenciada por el fenómeno del “El Niño” que cuando se presenta, las precipitaciones diarias se caracterizan por un incremento de su intensidad en la zona bajo influencia de este fenómeno; y el verano de junio a noviembre, una temporada seca y con temperaturas más bajas. Debido al cambio climático producto de la intensificación de la actividad humana industrializada estas estaciones han presentados cambios, provocando fuertes sequías en la región sierra, así como también severas inundaciones en la costa (Barros et al.,2010).

Sánchez, 2017, indica que el clima de la zona de San José de Minas es variado, dada su ubicación geográfica existen distintos nichos climáticos desde los 1100 msnm hasta los 4200 msnm. Las lluvias representan una fuente de alimentación de los procesos hidrológicos del territorio. Dada la estructura montañosa de la zona las aguas superficiales originan vertientes hidrográficas que a su vez moldean el clima de la parroquia. En la zona se distinguen dos diferentes climas que van desde muy húmedo subtropical de las cuencas hidrográficas, hasta el frío de los páramos. La temperatura media varía entre los 16° C y los 22° C.

El clima húmedo subtropical que concierne a un rango altitudinal de 250 a 1800 msnm, la temperatura media anual fluctúa entre 18 y 22,8°C, la precipitación promedio anual es de 2000 a 3000 mm. El número de meses ecológicamente secos varía de 1 a 5, dentro de este lapso el número de días fisiológicamente secos oscila entre 10 y 68. Este tipo de clima ocupa el 78,12% del territorio de la parroquia.

El clima Templado y húmedo subtropical de los páramos que se localiza al Occidente de San José de Minas, en un rango de altitud que va desde los 1400 hasta los 3200 msnm, con temperaturas promedio entre 12 y 18°C; las precipitaciones están entre 1500 y 2000 mm, las lluvias caen durante todo el año, aunque en menor cantidad en los meses de julio y agosto. Debido a este patrón de la estación lluviosa, no existe en la región meses ecológicamente secos y en consecuencia tampoco registra días fisiológicamente secos. Este tipo de clima ocupa el 12,18% del territorio.

2.2 Aspectos hidrológicos

2.2.1 Cuenca hidrográfica.

La cuenca se define como un área de captación natural de agua que proviene de las precipitaciones, la cual hace converger y confluir todos los escurrimientos (red de drenaje) hacia un único punto de salida o desembocadura (Ordoñez, 2011)

2.2.1.1 Componentes de una cuenca hidrográfica:

Según, Ordoñez, 2011, los componentes distintivos de una cuenca hidrográfica son:

Parteaguas. El parteaguas es un constituyente muy importante dentro de la formación de cuencas, pues es considerado como la línea imaginaria que delimita las cuencas hidrográficas, de tal forma que las aguas de lluvia se van repartiendo en una u otra cuenca. A través de este proceso de precipitación se irán formando cursos de agua, los cuales desembocarán en un cauce principal, y así sucesivamente dependiendo del orden de la cuenca. Para delimitar una cuenca es necesario conocer estos sitios de mayor elevación.

Río principal. Es considerado como el curso con mayor caudal de agua, o simplemente con mayor longitud. La mayoría de las cuencas hidrográficas seleccionadas tienen bien definido el río principal, considerándolo desde su desembocadura hasta cerca del parteaguas.

Afluentes. Estos corresponden a un curso de agua (denominados también tributarios), los cuales desembocan en un río de más importancia. Generalmente estos cursos de agua se consideran de menor importancia al río principal debido a sus diferencias por su caudal y longitud.

2.2.1.2 Delimitación de una cuenca hidrográfica

Por lo general esta delimitación se puede hacer por medio de fotografías aéreas, aunque es muy común utilizar mapas topográficos (escalas 1:50000 o 1:100000). El proceso consiste en trazar una línea divisoria (parteaguas), la cual se ubica en los puntos más altos y divide los cursos de escorrentía producida por cuencas distintas.

Es necesario considerar ciertas pautas para la delimitación correcta de una cuenca hidrográfica tales como: ubicar los puntos más altos determinados por las curvas de nivel, tener en cuenta que la línea divisoria debe pasar por los puntos altos pasando ortogonalmente por las curvas de nivel, y nunca cortar un río, quebrada o arroyo (Ordoñez,2011).

2.2.2 Características físicas de una cuenca hidrográfica

2.2.2.1 Perímetro de la cuenca

La longitud del contorno de toda el área de la cuenca, es decir, de la delimitación que se le dio a la misma. Es un parámetro significativo, teniendo en cuenta que puede ayudar a conocer la forma de la cuenca (Monsalve,1999).

2.2.2.2 Área de drenaje

Constituye la superficie plana de la cuenca en proyección horizontal, la cual está delimitada por el parteaguas (Monsalve,1999).

2.2.2.3 Forma de la cuenca

De acuerdo con Monsalve, 1999, la forma de una cuenca hidrográfica es relevante para poder establecer en gran medida su comportamiento hidrológico. Esta se relaciona con el tiempo de concentración (T_c), más conocido como el tiempo que toma el agua precipitada en los límites más extremos de la cuenca para llegar al punto de salida.

Para evaluar la forma de cualquier cuenca se han establecido dos coeficientes que se asocian a una relación área perímetro. Además, estos coeficientes procuran relacionar formas geométricas ya conocidas, como el círculo.

2.2.2.3.1 Coeficiente de Gravilias o Compacidad (K_c)

Es aquella relación que existe entre el perímetro de la cuenca y una circunferencia de un círculo que tenga la misma área de la cuenca.

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

A: Área de drenaje [Km^2]

P: Perímetro de la cuenca [Km]

Existen valores predeterminados del índice con el que se puede determinar la forma de la cuenca (Moreno,2015).

- $1,00 \leq K_c < 1,25$: Cuenca redonda a oval redonda
- $1,25 \leq K_c < 1,50$: Cuenca oval redonda a oval oblonga
- $1,50 \leq K_c < 1,75$: Cuenca oval oblonga a rectangular oblonga

2.2.2.3.2 Factor de forma (Kf)

Conocido también como factor de forma Horton, pues él ha sugerido una relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de su largo axial, medido a lo largo del río principal (desde su desembocadura hasta la cabecera más distante).

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

Donde:

A: Área de drenaje [Km²]

L: Longitud axial de la cuenca [Km]

Los siguientes rangos pueden ayudar a definir la forma de la cuenca hidrográfica:

Tabla 1. Valores interpretativos del Factor de forma

Valores Aproximados	Forma de la cuenca
< 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 - 1.20	Muy ensanchada
> 1.20	Rodeando el desagüe

Fuente: Ordoñez, 2011

2.2.2.3.3 Relación de circularidad

Este coeficiente es el cociente entre el área de la cuenca y la del círculo cuya circunferencia es equivalente al perímetro de la cuenca.

$$Rci = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Su valor es unitario para una cuenca circular, y para una cuenca cuadrada corresponde a un valor de 0,785.

2.2.2.3.4 Relación de elongación

Se define como la relación del diámetro (D) de un círculo que tenga la misma superficie de la cuenca y la longitud máxima de la cuenca (Lm). Esta longitud a su vez se define como la más grande dimensión de la cuenca a lo largo de una línea recta trazada desde la desembocadura hasta el límite extremo del parteaguas y de manera paralela al río principal (Campos, 1992).

$$Re = \frac{D}{Lm} = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{Lm}$$

Cuando la cuenca es plana el valor de Re se aproxima a la unidad; para cuencas con relieve pronunciado, el valor resultante se encuentra entre 0.6 y 0.9.

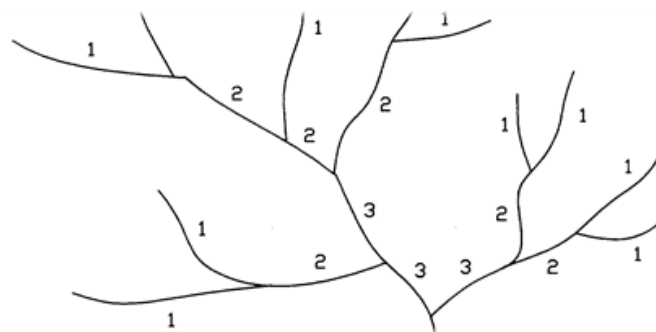
2.2.2.4 Sistema de drenaje

Moreno y Esquivel (2015) indican que los principales componentes que caracterizan un sistema de drenaje son los siguientes:

2.2.2.4.1 Orden de las corrientes de agua

Se representa a través de un número, en donde se ve reflejado el grado de bifurcación del sistema de drenaje dentro de una cuenca. Ejemplo de una cuenca de orden 4:

Ilustración 1. Orden de las corrientes de agua



Fuente: Estudio morfométrico de la cuenca del río Azul (Moreno & Esquivel, 2015)

2.2.2.4.2 Densidad de drenaje

Esta relación de la longitud total de cursos de agua y su área total, en cierta forma, representa la dinámica de la cuenca, refiriéndose a la estabilidad de la red hidrológica y el tipo de escorrentía superficial. Una cuenca con alta densidad implica que está bien drenada, ya que los ríos y afluentes actúan como caminos preferenciales de flujo. Así mismo se puede establecer el comportamiento de una cuenca a una precipitación.

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

Para poder determinar la eficiencia de drenaje en una cuenca hidrográfica se han definido los siguientes rangos de acuerdo con la densidad obtenida:

- $Dd < 0,5 \text{ km/km}^2$: Cuencas con drenaje pobre
- $0,5 \leq Dd < 1,5 \text{ km/km}^2$: Cuencas con drenaje regular
- $1,5 \leq Dd < 2,5 \text{ km/km}^2$: Cuencas con drenaje bueno
- $2,5 \leq Dd < 3,5 \text{ km/km}^2$: Cuencas con drenaje muy bueno
- $Dd \geq 3,5 \text{ km/km}^2$: Cuencas excepcionalmente bien drenadas

2.2.2.4.3 Extensión media de la escorrentía

Se define como la distancia media que el agua lluvia tendría que escurrir sobre los terrenos de una cuenca en línea recta del punto donde ocurrió su caída hasta el curso de agua más próximo. Se puede decir que aporta una idea a la distancia media del escurrimiento superficial. Aquí existe una relación entre el área de la cuenca (A) y la longitud total de los cursos de agua (L).

$$l = \frac{A}{4L}$$

2.2.2.4.4 Sinuosidad de las corrientes de agua

Es la relación que existe entre la longitud del río principal medida a lo largo de su cauce (L) y la longitud del valle del río principal (Lt).

$$S = \frac{L}{Lt}$$

Se puede obtener de dos formas. En la primera L_t es una línea recta medida desde la desembocadura hasta la parte más alta del río principal. En la segunda L_t será representada por medio de una línea curva medida desde su desembocadura hasta la parte más alta del río principal. Este parámetro da una medida aproximada de la velocidad de la escorrentía del agua a lo largo de la corriente. Cuando este valor resulte menor o igual a 1,25 indica una baja sinuosidad. Por ende, se podría caracterizar al río principal por tener un lineamiento recto.

2.2.2.4.5 Pendiente de la cuenca

Es una característica importante en el estudio hidrológico ya que controla la velocidad de escorrentía, así también controla el tiempo necesario para que el agua de las lluvias se concentre en los ríos pertenecientes a la cuenca en estudio (Monsalve, 1999).

2.2.2.4.6 Tiempo de concentración

Es el tiempo que la lluvia que cae en el punto hidráulicamente más distante de la corriente de agua de una cuenca toma para llegar a una sección determinada de dicha corriente. El tiempo de concentración mide el tiempo que se necesita para que toda la cuenca contribuya con escorrentía superficial en el punto de salida de la cuenca. Uno de los métodos para determinar en el tiempo de concentración y que se empleará en este estudio es la fórmula de Kirpich (1940).

$$T_c = 0.0194 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

Donde:

L=Longitud del cauce mayor de la cuenca (m).

S= pendiente promedio de la cuenca (m/m).

2.2.3 Características hidrológicas de la cuenca

2.2.3.1 Precipitación

Caída de hidrometeoros del cielo que llegan a la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve, granizo, llovizna. Cuando está en estado líquido se expresa en milímetros (mm) o litros por metro cuadrado (l/m²). Este fenómeno meteorológico es variable y por ende su estudio es fundamental en una cuenca hidrográfica. El análisis de las precipitaciones en una

cuenca hidrográfica es útil para poder predecir eventos máximos que pueden provocar inundaciones. La medición de las precipitaciones se realiza mediante estaciones meteorológicas que estiman la cantidad, intensidad y duración de las precipitaciones que se presentan en la cuenca hidrográfica (Sorto y Villalta, 2013).

2.2.3.2 Permeabilidad

La permeabilidad del suelo es la capacidad para permitir el paso de un fluido por sus poros sin que este tránsito modifique la estructura propia del suelo. Los suelos para obras de ingeniería civil pueden clasificarse en, suelos permeables, semipermeables e impermeables (Ordóñez, 2011).

2.2.3.3 Escorrentía superficial

“La escorrentía superficial consiste en la ocurrencia y el transporte de agua en la superficie terrestre, comprende el exceso de precipitación que ocurre después de una lluvia y se mueve libremente por la superficie del terreno” (Monsalve, 1999).

2.3 Centrales hidroeléctricas

2.3.1 Definición

Instalación compuesta por un conjunto de elementos estructurales y mecánicos, que aprovechan la altura de caída de una masa de agua y del caudal de un río para la producción de energía eléctrica.

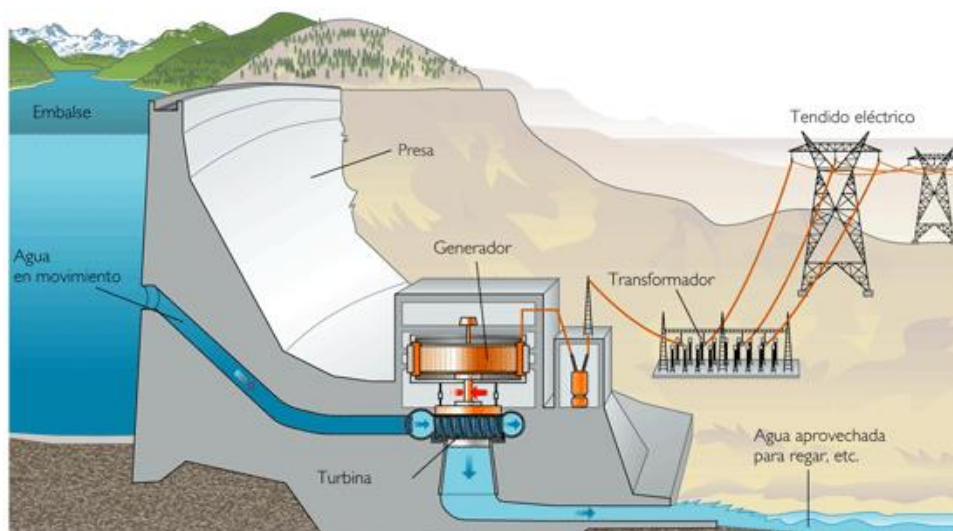
2.3.2 Funcionamiento de una central hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica es un tipo de energía renovable que aprovecha la fuerza del agua para generar electricidad limpia. En las centrales hidroeléctricas más comunes el agua que transportan los ríos es almacenada en un embalse y liberada cuando se necesita producir energía, a estas centrales se les denomina centrales de pie de presa. El agua desembalsada cae con fuerza aprovechando la diferencia de altura sobre una turbina hidráulica y la hace girar siempre a la misma velocidad, pero con mayor fuerza cuanto más agua pasa. La energía cinética derivada de la rotación constante de la turbina es transformada en energía eléctrica en los generadores eléctricos de la sala de máquinas. Después se eleva la tensión de la electricidad producida para que pueda incorporarse a la red y transportarse con menores pérdidas hasta los puntos de distribución donde se vuelve a bajar la tensión para los puntos

de consumo. El agua utilizada en el proceso retoma el curso natural del río aguas abajo tras pasar la central.

Otro tipo de centrales hidroeléctricas son las fluyentes que aprovechan el desnivel natural del río para el salto y tienen un pequeño remanso para derivar el agua por un canal hasta la central.

Ilustración 2. Esquema de una central hidroeléctrica



Fuente: <https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/energia-hidroelectrica/centrales-hidroelectricas-l37030>

2.3.3 Componentes de una central hidroeléctrica

La central hidroeléctrica San José de Minas posee una captación de pasada en el río Cubi, conformada por un azud de derivación de 2,5m de altura y toma lateral, un tanque que entrega los caudales captados a un desarenador ubicado inmediatamente debajo de este para luego ser transportados por una canal de 4,5 km hacia el tanque de presión que permite la puesta en carga de una tubería de acero de diámetro 1,07m y de 536 m de longitud. La casa de máquinas está equipada con dos turbinas Pelton iguales de eje horizontal.

2.3.3.1 Captación

Infraestructura que permite captar el recurso afluente que alimentará la central para la generación de energía eléctrica, también regula la entrada de agua en épocas de crecida.

2.3.3.2 Azud de derivación

Construcción que se levanta en el lecho del río para atajar el agua, lo que provoca una elevación del nivel de agua con el fin de derivar parte de dicho caudal y además está dispuesta para que las aguas puedan verter por encima (Ibáñez, 2015).

2.3.3.3 Toma lateral

Obra de captación superficial compuesta por una estructura de desviación que hace que parte del caudal se dirija hacia un canal lateral, cuenta también con un azud de derivación que asegura una cota de nivel para forzar el ingreso del agua a dicho canal (Ortiz, 2011).

En las obras de captación de la central hidroeléctrica San José de Minas se contempló el uso del sistema de captación Coanda el cual consiste en el empleo de un tamiz hidráulico o reja estática auto limpiante la cual separa los líquidos y sólidos de una manera efectiva. Coanda es una malla colocada en un sistema de captación de agua para evitar la sedimentación en el lecho del río, aguas arriba de una bocatoma y el ingreso de sólidos en una tubería de conducción (Valenzuela, 2011).

Ilustración 3. Malla Coanda

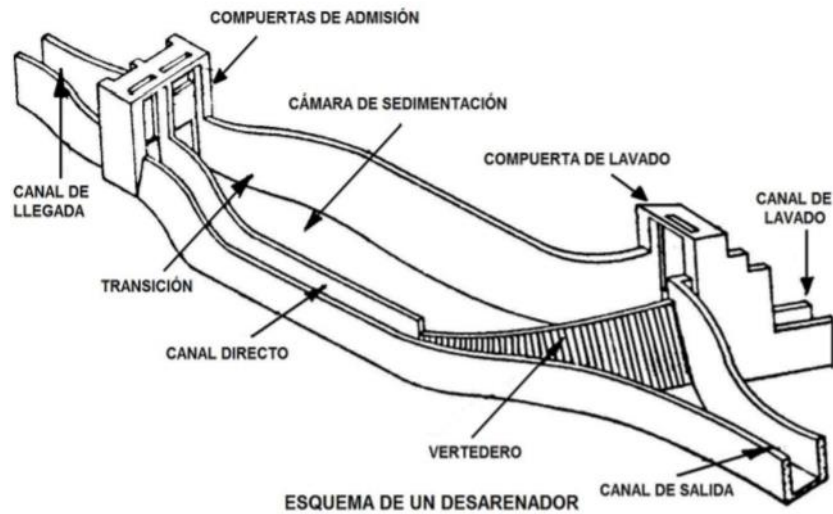


Fuente: <https://www.mallacoanda.com/informacion-del-producto/>

2.3.3.4 Desarenador

Es un tanque que sirve para sedimentar el material sólido en suspensión que lleva el agua de un canal para su posterior eliminación. Este tanque en su comienzo tiene una pendiente fuerte que genera un resalto al final de esta, haciendo así que los sedimentos se concentren y fluyan hacia el fondo del tanque, donde hay un canal con pendientes que lo va a dirigir hacia una compuerta de limpieza para eliminar dichos sedimentos (Jara & Sebastián, 2015).

Ilustración 4. Elementos de un desarenador



Fuente: <https://es.slideshare.net/mgarcianaranjo/diseo-de-desarenadores>

2.3.3.5 Conducción

Es una obra destinada a la conducción del agua desde la captación hasta la casa de máquinas. Esta obra permite transportar el caudal de diseño a través de un canal ya sea abierto o cerrado, pero manteniéndose la presión atmosférica, es decir posee siempre una gradiente positiva.

2.3.3.6 Canal

Un canal de conducción es una construcción abierta a la atmósfera consignada al transporte de fluidos en una superficie libre, esta obra debe tener un calado y una velocidad semejante a lo largo del tramo para tener un gradiente hidráulico constante (Chow, 1994).

2.3.3.7 Tanque de presión

Es una estructura ampliamente usada en centrales hidroeléctricas en derivación con conducciones relativamente largas ubicadas al final de esta, una un sistema de baja presión (conducción) con uno de alta presión (tubería de presión). Este tanque cuenta con una capacidad suficiente para garantizar la partida o parada brusca de las turbinas, además, conserva una altura de agua suficiente que evite el ingreso de aire a los equipos de generación y también permite la conexión entre el sistema de conducción y la tubería de presión. (Quintero, 2009)

2.3.3.8 Compuertas

Dispositivo hidráulico que se utiliza para regular el paso de agua. Estos elementos se instalan en diferentes unidades de la central hidroeléctrica como: conducciones de agua a la entrada de la cámara de carga, tuberías, canales, aliviaderos.

2.3.3.9 Tubería de presión

Es aquella tubería capaz de tolerar grandes presiones y la que se faculta a trasladar agua desde la captación hasta las turbinas (Coz, 1995).

2.3.3.10 Válvulas

Son elementos imprescindibles en la presa y en las centrales hidroeléctricas, pues permiten controlar el nivel de agua en las presas, regulan el caudal de descarga de fondo y el caudal ecológico (Sanz, 2008).

2.3.3.11 Casa de máquinas

La Casa de Máquinas es el lugar donde se encuentra el conjunto de equipos usados directa o indirectamente para la generación de energía eléctrica, estos incluyen las construcciones como edificios y obras civiles necesarias para que todo en conjunto se encuentre en operación. En este espacio tiene lugar el proceso de conversión de energía cinética a energía mecánica y de mecánica a energía eléctrica ya que aquí se encuentran las turbinas (Valle, 2013).

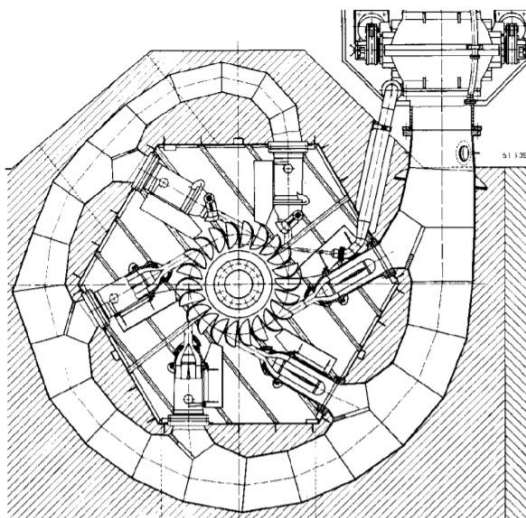
2.3.3.12 Turbinas

Elemento rotario que transforma la energía cinética de la corriente de agua en energía mecánica. Los tipos de turbinas usadas en las centrales hidroeléctricas varían en relación con la altura de salto y el caudal disponible.

2.3.3.13 Turbinas Pelton

La turbina de chorro libre fue inventada alrededor de 1880 por Lester Pelton. En las turbinas de acción se convierte previamente la energía de presión del fluido en energía cinética, lo que crea un chorro libre en la atmósfera. Este chorro se hace incidir sobre los álabes de un rotor, que gira asimismo en el seno de la atmósfera, desviando el chorro, apareciendo por ello un par sobre él que se utiliza para extraer la energía (Reyes,1965).

Ilustración 5. Esquema Turbinas Pelton



Fuente: <https://docplayer.es/50246687-Iii-turbina-pelton.html>

2.4 Hidráulica de ríos y canales

2.4.1 Generalidades sobre ríos

Según Krochin, 1982, los ríos son el resultado de la concentración de los escurrimientos superficiales en cauces que generalmente son formados por la misma acción del agua. Los ríos ocupan la parte más baja del terreno y por lo tanto entre dos ríos siempre existe una línea divisoria de terreno más alto que se llama *divortium acuorum*. La superficie total dentro la cual todas las aguas originadas por la precipitación confluyen hacia el río y que está delimitada por la línea divisoria se llama cuenca hidrográfica del río.

Los ríos se forman de aguas superficiales resultantes de las lluvias y de la fusión del hielo en las montañas y de la afluencia de las aguas subterráneas. La proporción entre las aguas que corren superficialmente al río y las que se infiltran depende de muchos factores entre los que está la permeabilidad del suelo, su pendiente y la presencia de vegetación. La existencia de bosques disminuye el escurrimiento superficial y aumenta la infiltración; en cambio, en zonas con poca vegetación aumenta la escorrentía superficial y la erosión del suelo.

La regularidad del cauce del río depende las condiciones de almacenamiento subterráneo del agua. Mientras mayor es la capacidad de infiltración y almacenamiento de los suelos, mayor es la proporción de las aguas de precipitación que llegan al río por vía subterránea. Las aguas subterráneas sirven de regulación para un río y por esto el caudal es más grande y uniforme

en las partes más bajas del cauce de un río. En todos los ríos pueden identificarse tres tramos representativos:

- El primer tramo concierne a la parte alta del río que se caracteriza por caudales pequeños, pero con grandes crecientes, fuertes gradientes y altas velocidades. Como resultado, la erosión es activa, el cauce es profundo y el río escurre por un valle hondo y estrecho.
- El tramo medio posee caudales mayores y gradientes menores. El río corre por un valle amplio y la erosión y el depósito de sedimentos se produce al mismo tiempo. Existe un cierto equilibrio en cuanto al caudal sólido, por lo que es en este tramo en donde conviene ubicar obras de toma.
- El tramo bajo se caracteriza por grandes caudales y pequeñas gradientes y velocidades. Es en este trecho donde se produce el depósito de sedimentos y la elevación del cauce. En estos tramos los ríos siguen cursos tortuosos serpenteando por los depósitos aluviales.

2.4.2 Aspectos de hidráulica fluvial

2.4.2.1 Modelo bifásico

Según Rocha, 1998, el río ajusta su forma, su alineamiento y su pendiente para menguar el trabajo efectuado o la energía por unidad de superficie. El caudal es siempre variable según el régimen hidrológico de la cuenca y puede estar sujeto a un evento meteorológico. La forma del río responde a caudales recurrentes y las crecidas extraordinarias pueden transformar la naturaleza o el curso del río concediéndole un comportamiento dinámico.

Un río mantiene un flujo de dos fases de agua y sedimentos procedente del cauce o de la cuenca, son dos movimientos interdependientes que no deben ser tratados separadamente. El régimen hidráulico de un río se adapta las velocidades altas de erosión mediante una sucesión de régimen lento y rápido. Los ríos se encuentran sometidos a crecidas modificando el equilibrio del cauce al formarse erosiones considerables. Las dos fases deben ser estudiadas de manera conjunta. Al estudiar el flujo es de suponerse un movimiento permanente, uniforme, bidimensional de un fluido real con una superficie libre y que se debe a la acción de la gravedad. La pendiente de la línea de energía produce la fuerza que origina el flujo del agua y éste causa el movimiento sólido. El flujo bidimensional tiene lugar cuando

las partículas fluidas se mueven en planos o en planos paralelos de forma que la configuración de las líneas de corriente es idéntica en cada plano.

El transporte de sedimentos es el estudio de los procesos de erosión, iniciación de movimiento, transporte, depósito y compactación de las partículas sólidas. El transporte de sedimentos en un río puede clasificarse acorde a dos criterios: según el modo de transporte y según el origen del material.

Según el modo de transporte, el sedimento puede ser transportado en suspensión sostenido en el seno del flujo por la turbulencia, o bien por el fondo rodando, deslizándose o saltando. Una partícula inicialmente en reposo puede ser transportada rodando o saltando cuando se supera el umbral del movimiento, pero si la corriente sigue creciendo, puede ser luego transportada en suspensión.

Por el origen del material, el sedimento puede ser transportado desde la cuenca hidrográfica del río desde el lecho del río. Este material es muy fino (limos y arcillas) y se transporta en suspensión y se conoce como carga de lavado, la cual está relacionada a las características hidrológicas de la cuenca: tipo de suelos y cobertura, topografía, precipitaciones, etc.

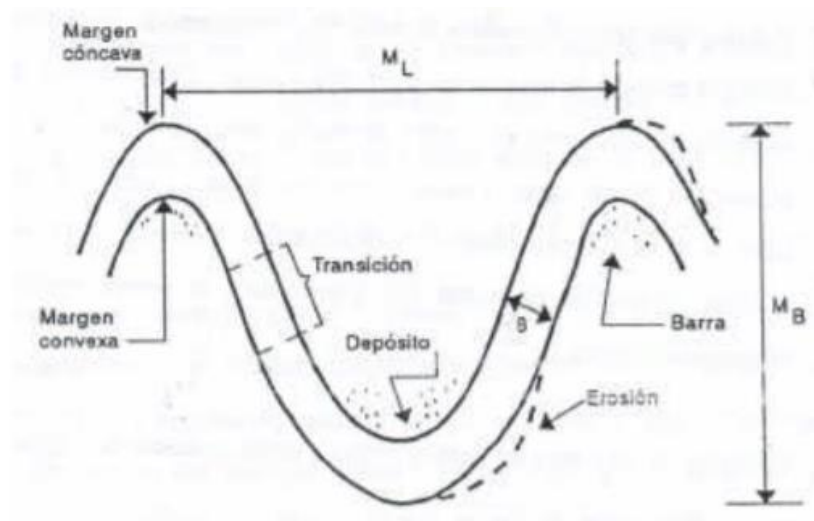
Según, H.A Einstein, 1950, “Toda partícula sólida que pasa a través de una sección de un río debe satisfacer las dos condiciones siguientes: a) debe provenir de la erosión de un punto de la cuenca situado aguas arriba de la sección considerada, b) debe haber sido transportada por la corriente desde el punto de erosión hasta la sección considerada. Cada una de estas dos condiciones limita la cantidad de sedimentos a través de la sección considerada en función de la disponibilidad de sólidos en la cuenca y la capacidad de transporte de la corriente”.

2.4.2.2 Movilidad fluvial

Hidráulicamente, un río es un canal, pero su comportamiento es diferente al que corresponde a la simplificación del estudio de canales. En un río no existe movimiento permanente, ya que el caudal varía continuamente. Tampoco hay movimiento uniforme, debido a que la sección transversal cambia a lo largo de su recorrido. En virtud del principio de autoajuste de los ríos, los ríos aluviales tienen una tendencia a adquirir determinados anchos, profundidades, pendientes y tamaño de meandros en función de sus características originando una tendencia a originar meandros.

Un meandro es el mecanismo natural por el cual un río ajusta su pendiente cuando la del valle por donde fluye es mayor que la necesaria; también se define como cada una de las curvas que describe el curso de un río. La geometría de un cauce con meandros está determinada por la erosión y socavación del margen externo o cóncavo y el depósito de sedimentos a lo largo del margen interior o convexo (Rocha, 1998).

Ilustración 6. Meandros



Fuente: <http://infofich.unl.edu.ar/upload/d6756e3ca8809c71a4e5618b7032195de88fa69c.pdf>

Lane, 1957, estableció una relación entre el caudal medio, la pendiente, el material de fondo y de las márgenes y de la forma del río en planta. La ecuación que propone para ríos con meandros y trezados si el fondo es de arena es:

$$S = \left(\frac{K}{2.44}\right)Q^{-0.25}$$

Donde:

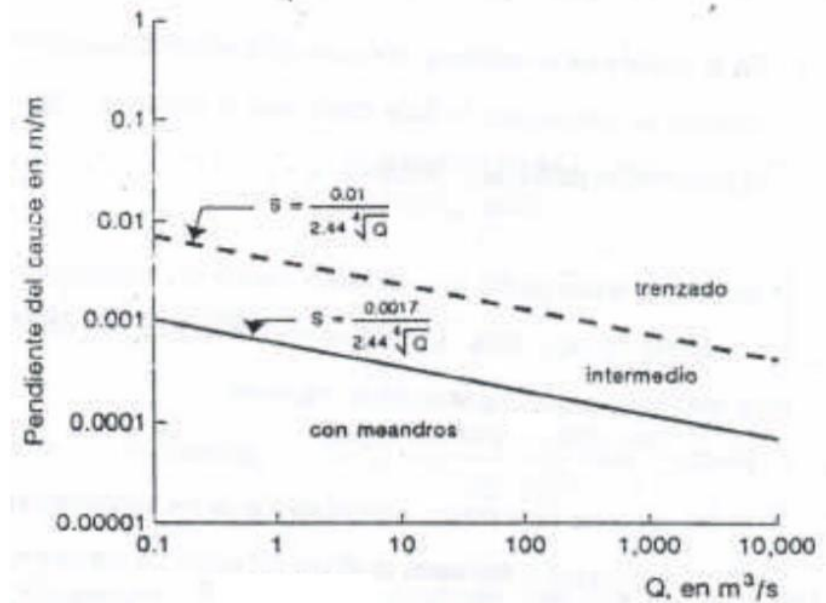
S: pendiente [m/m]

Q: caudal medio anual [m³/s]

K: coeficiente para la forma del cauce en planta.

Con los valores de Q y S se obtiene un punto en la gráfica. Si el punto queda bajo la recta de $K = 0.0017$, el río es meandroso, si queda sobre la recta de $K = 0.01$ será trezado y si está entre las dos será intermedio.

Ilustración 7. Relación entre pendiente y caudal según expresión de Lane



Fuente: https://transportesedimentos.tripod.com/esp/pagina_nueva_17.htm

2.4.2.3 Geometría Hidráulica

De acuerdo con Rocha, 1998, la morfología de los cauces varía en el tiempo y es afectada fundamentalmente por el caudal, el material transportado, el diámetro representativo del material de fondo, la pendiente del lecho, la relación entre el ancho de la superficie libre y el tirante, y la configuración de curvas. Todo esto conlleva a dificultades en la descripción hidráulica de los fenómenos observados. Por ejemplo, en los ríos el coeficiente de resistencia o rugosidad resulta incierto debido a que el fondo está cambiando en función del caudal y el río puede profundizar o sedimentar, además, en el fondo se presentan formas características (rizos, dunas) que dan una resistencia adicional y variable dificultando la estimación de este coeficiente.

Dentro de las muchas circunstancias que pueden determinar la forma y apariencia de los ríos están las siguientes:

- Variabilidad temporal de las descargas. Variabilidad en las descargas a lo largo del año creando la movilidad fluvial y las formas y cursos cambiantes de los ríos.
- Características del transporte sólido. Depende de las posibilidades de erosión que puedan desarrollarse en la cuenca. El desarrollo e intensidad del transporte sólido del tiempo es un factor relevante en la configuración fluvial.
- Presencia de vegetación. Contribuye a la fijación del curso del río.

2.4.3 Canales

Como se mencionó anteriormente los canales se caracterizan por tener una superficie libre en contacto con la atmósfera. Si se considera que el flujo es una consecuencia del peso del fluido entonces desde el punto de vista hidráulico un canal se comporta como si fuese un río.

2.4.3.1 Tipos de canales

Si bien los canales se pueden clasificar de acuerdo con diversos criterios, para fines prácticos de la ingeniería se los divide en dos grandes grupos, los canales naturales que son los que existen de manera natural en la corteza terrestre, como arroyos o ríos, y los canales artificiales que son aquellos construidos por actividad humana.

Ilustración 8. Canal natural (Río)



Fuente: <https://www.hola.com/viajes/galeria/2014032170330/rios-mundo-dia-mundial-agua/1/>

Ilustración 9. Canal artificial (Canal de conducción en una central hidroeléctrica)



Fuente: <https://www.enel.pe/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-hidroelectrica-y-como-funciona.html>

2.4.3.2 Tipos de flujo en canales

Mott, 2006, indica que en un canal abierto pueden presentarse diferentes tipos de flujo debido a los cambios constantes de pendiente, obstáculos o características propias de un proyecto. A continuación, se detallan los conceptos de los distintos tipos de flujo a gravedad.

- **Flujo permanente y no permanente**

Estos tipos de flujo tienen como criterio el tiempo. Un flujo es permanente cuando la profundidad del flujo no cambia o es constante en el tiempo, por otro lado, un flujo es no permanente cuando la profundidad cambia con el tiempo. En el estudio de flujo permanente el caudal es constante en el tiempo por lo que para los cálculos se utiliza la ecuación de continuidad.

$$Q = V_1 * A_1 = V_2 * A_2$$

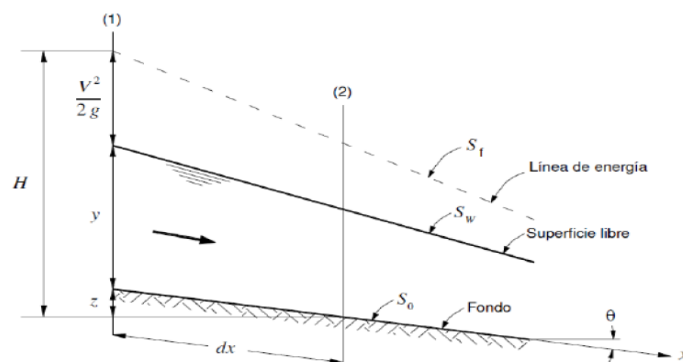
- **Flujo uniforme y flujo variado**

Tienen como criterio el espacio. Se dice que el flujo es uniforme cuando la profundidad del flujo es la misma en cada sección del canal y por lo tanto la pendiente y velocidad permanecen constantes, por el contrario, se dice que un flujo es variado cuando estos parámetros varían a lo largo del canal.

- **Flujo uniforme y permanente**

Es el tipo de flujo usado principalmente en la hidráulica de canales y tiene como características que la profundidad, caudal, área mojada y velocidad son constantes; y las líneas de energía, de superficie de agua y del fondo del canal son paralelas entre sí, es decir tienen la mismas pendiente.

Ilustración 10. Flujo en canales abiertos



Fuente: Robert Mott. Mecánica de Fluidos.

2.4.3.3 Estados de flujo en canales

De acuerdo con, Mott, 2006, el comportamiento de un fluido en canales abiertos depende de 3 variables: la densidad del fluido, su viscosidad y la velocidad promedio del flujo. Osborne Reynolds fue el primero en pronosticar el estado de flujo si se conoce la magnitud de un número adimensional al que hoy se denomina número de Reynolds (Re). Este número es la relación de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido a la fuerza viscosa. Así, debido al efecto de la viscosidad y gravedad en relación con la inercia el flujo puede ser laminar, transicional o turbulento.

$$Re = \frac{v L}{\mu}$$

Donde:

v : Velocidad

L : Longitud característica

μ : Viscosidad cinemática

- **Flujo Laminar:** $Re < 2000$, en este estado las partículas siguen líneas de corriente definidas y las fuerzas viscosas predominan a las fuerzas inerciales.
- **Flujo Transicional:** $2000 < Re < 4000$. Las partículas pasan de flujo laminar a flujo turbulento y viceversa.
- **Flujo Turbulento:** $Re > 4000$. En este estado las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales y las partículas siguen una trayectoria irregular. El número de Reynolds y los términos laminar y turbulento no son suficientes para caracterizar todas las clases de flujo en canales abiertos. Además de la viscosidad y sus efectos inerciales, es relevante la relación de las fuerzas inerciales a las gravitacionales que está dada por el número de Froude (N_F).

$$N_F = \frac{v}{\sqrt{gY}}$$

Donde:

v : Velocidad media

g : Gravedad

Y : Profundidad Hidráulica

La profundidad Hidráulica se define como la razón entre el área de la sección transversal del agua perpendicular a la dirección de flujo y el ancho de la superficie libre, en canales rectangulares la profundidad hidráulica es igual a la profundidad de flujo.

Mediante el número de Froude se pueden definir tres estados de flujo.

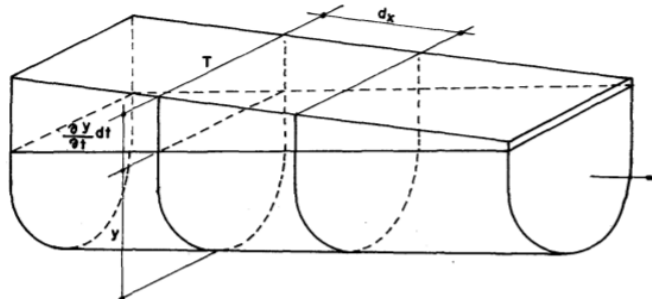
- **Flujo Crítico.** Cuando $N_F = 1$
- **Flujo Subcrítico.** Cuando $N_F < 1$. Las fuerzas gravitacionales son predominantes, la velocidad es baja y el flujo es tranquilo.
- **Flujo Supercrítico.** Cuando $N_F > 1$. Las fuerzas inerciales son predominantes, la velocidad es alta y el flujo es rápido.

2.4.3.4 Principios básicos de la hidráulica del flujo no permanente

Es el flujo que más similitud tiene con las condiciones reales presentes en la naturaleza. El análisis de este flujo se caracteriza por tener una variación en todos los parámetros

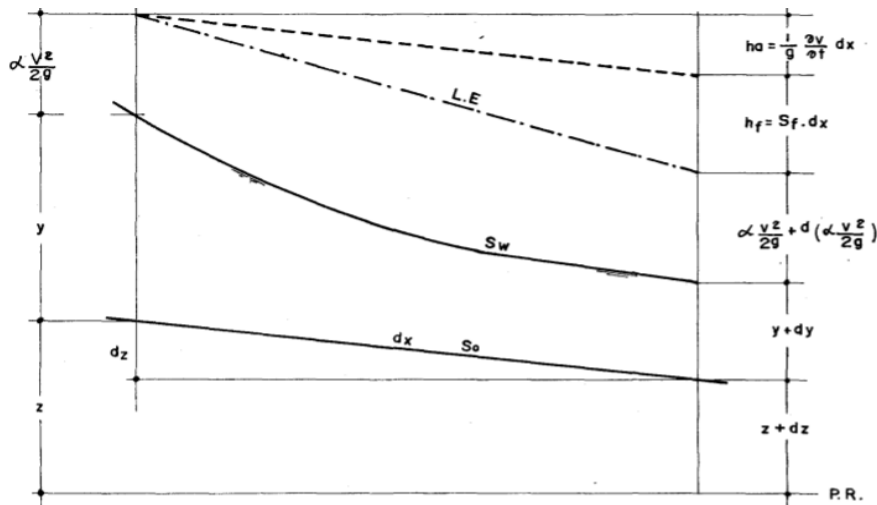
hidráulicos: calado, caudal y velocidad a lo largo del tiempo. Para encontrar sistemas de cálculo más rápidos y controlables se deben realizar distintas suposiciones y simplificaciones en las ecuaciones para realizar el análisis hidráulico.

Ilustración 11. Continuidad de flujo no permanente



Fuente: (Chow V., 1994)

Ilustración 12. Energía en flujo no permanente



Fuente: (Chow V., 1994)

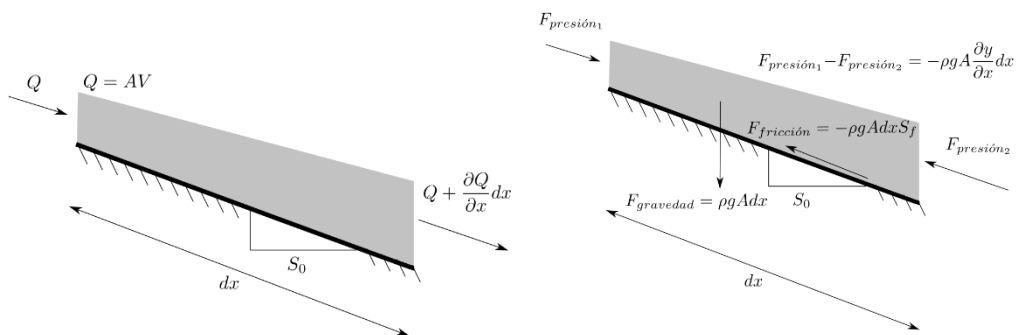
Según Checa, 2013, en un canal abierto lo normal es que el flujo sea permanente, solo eventualmente se presentan olas que hacen que el flujo sea no permanente. La presencia de ondas oscilantes o traslacionales originan desplazamientos de las partículas del agua. El flujo no permanente solo puede darse en condiciones de flujo variado ya que es prácticamente

imposible que la superficie del agua cambie de un tiempo a otro, pero permanezca paralela al fondo del canal para obtener un flujo uniforme no permanente.

Las ecuaciones de Saint Venant describen el flujo unidimensional no permanente en un canal abierto. Estas ecuaciones están conformadas por la ecuación de conservación de la masa y de momento que son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales tipo hiperbólico con coeficientes variables, esto hace que no puedan ser integradas de manera exacta y por lo tanto son necesarias algunas simplificaciones:

- El flujo es unidimensional; la velocidad y la profundidad varían solo en una dirección de la longitud del canal. Así, la superficie del agua es horizontal en cualquier sección transversal perpendicular al eje de longitudinal del canal y la velocidad del agua es constante.
- El fluido es incompresible y de densidad constante a lo largo del fluido.
- El eje longitudinal del canal es prácticamente una línea recta.
- El flujo varía gradualmente a lo largo del canal, por lo que las aceleraciones verticales pueden despreciarse y la presión hidrostática prevalece.
- El lecho es fijo y la pendiente del fondo del canal es pequeña, lo que significa que los efectos de socavación y deposición son despreciables.
- Distribución uniforme de velocidades en cada sección, despreciando las variaciones transversales de velocidad dentro de la misma.

Ilustración 13. Esquema de balance masa, continuidad, y balance de fuerzas para ecuaciones de Saint Venant



Fuente: (Chow V., 1994)

Con las hipótesis principales establecidas, se aplican los principios de conservación de la masa (ecuación de continuidad) y la ecuación de equilibrio de fuerzas (momentum).

- **Ecuación de Continuidad**

$$v \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

- **Ecuación de Momentum**

Representa todas las fuerzas que actúan sobre el agua

$$\frac{\partial y}{\partial t} + v \frac{\partial y}{\partial x} + g \frac{\partial v}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0$$

Donde:

t: Tiempo

v: Velocidad media del agua en la dirección longitudinal

y: Nivel del agua en dicha sección

x: Abscisa a lo largo del conducto

g: Aceleración de la gravedad

S_o : Pendiente del fondo del canal en la dirección longitudinal

S_f : Pendiente de la línea de energía (fricción)

2.5 Sistemas de Alerta Temprana

2.5.1.1 Definición

Según Armién, 2011, los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) son estructuras constituidas por instrumentos, procedimientos y personas a través de los cuales se monitorea las amenazas, se recolectan y procesan datos ofreciendo pronósticos de sus posibles efectos con el objetivo principal de alertar sobre la ocurrencia de amenazas a los pobladores con suficiente antelación para que estos pueden evacuar y proteger sus medios de vida de manera oportuna; estos sistemas deben contar con los siguientes elementos:

- Conocimiento del riesgo: esto implica coleccionar, evaluar y compartir información sobre vulnerabilidad y capacidad adaptativa. Se basa en estudios sobre las características del territorio y de los fenómenos naturales que podrían ocurrir.
- Observación sistemática: es un seguimiento técnico que establece un sistema de monitoreo y alerta con recursos tecnológicos (considerando pronósticos a corto plazo, decadales, mensuales, y trimestrales).
- Comunicación y alerta: difusión de advertencia a la central San José de Minas sobre el riesgo.
- Preparación y respuesta: conciencia y preparación para actuar ante la amenaza.

2.5.1.2 Sistema de Alerta Temprana para inundaciones

Las inundaciones ocurren cuando el río sufre un aumento excesivo de su caudal, desbordándose y saliendo de su cauce normal, afectando sus zonas de influencias. Entre las posibles causas se tiene lluvias constantes y fuertes, obstrucción de caudales, ruptura de presas y diques, entre otros. Un Sistema de Alerta Temprana para inundaciones monitorea las condiciones hidrometeorológicas y el comportamiento de las cuencas hidrográficas, con lo que se estima la probabilidad de ocurrencia de una inundación en una zona dada (Armién, 2011).

2.5.1.3 Componentes de un Sistema de Alerta Temprana

Según Ramírez, 2019, para la implementación de un Sistema de Alerta Temprana se deben tomar en cuenta cuatro elementos esenciales:

2.5.1.4 Conocimiento y vigilancia permanente del peligro en tiempo real

Involucra identificar las amenazas y tener conocimiento de los riesgos o eventos con potencial de peligro que pudieran afectar a las infraestructuras, poblaciones y recursos. Para este componente se requieren mapas que identifiquen los lugares con riesgo de inundación; además, para realizar la vigilancia es preciso contar con instrumentos de monitoreo permanentes.

2.5.1.5 Seguimiento con respaldo técnico e institucional

El monitoreo es un proceso permanente y que depende de la información emitida por instituciones competentes con el tema, en este caso el INAMHI, así el seguimiento y evaluación de una amenaza tendrá un fundamento científico. Las instituciones nacionales que trabajan en conjunto con la Secretaría de Gestión de Riesgos deben participar activamente para establecer operaciones y acciones relacionadas a la respuesta ante un evento adverso.

2.5.1.6 Difusión y comunicación

Consiste en el uso de los medios de comunicación disponibles para motivar y concientizar a los habitantes de las comunidades y sus autoridades locales sobre la relevancia del conocimiento de los riesgos, así mismo para crear canales que permitan difundir las estrategias de evacuación, emisión de alertas y emergencia, durante y luego del suceso. Todo SAT hace uso de un cuadro de estados de control para determinar en qué condiciones se emite una alerta, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2. Tipos de alerta en un SAT

Tipo de alerta	Descripción
ROJA	El impacto y el desastre generado requieren de evaluación para la respuesta.
NARANJA	Condiciones de inundaciones críticas
AMARRILLA	Incremento de la manifestación de inundación.
VERDE	Situación normal.

Fuente: Ramírez, 2019

2.5.1.7 Capacidad de respuesta

Se necesita la participación directa de las comunidades y de las autoridades locales para el manejo de las emergencias. Deben estar organizados y contar con planes de respuesta actualizados, es responsabilidad de ellos desarrollar y ordenar la capacidad de respuesta de la población. Los SAT son parte de la preparación y contribuyen con información para la toma de decisiones oportunas, también consideran la implementación de protocolos,

recursos humanos, materiales y equipos que son organizados y dispuesto a las autoridades para liderar el proceso de respuesta.

2.5.1.8 Funcionamiento de un Sistema de Alerta Temprana

Según Miranda, 2016, el funcionamiento de un Sistema de Alerta Temprana consiste en los siguientes pasos: lectura y registro de la medición de los instrumentos sobre el evento monitoreado; transmisión de los datos registrados; procesamiento y análisis de los datos entregados; pronóstico de la situación; establecimiento del nivel y tipo de alerta; difusión del nivel de alerta; activación de un Plan de Emergencias o Evacuación.

1.-Lectura y registro: Se mide la cantidad de lluvia precipitada y el nivel de caudal de los ríos, cuando el fenómeno monitoreado provoca alguna alteración es registrado por los instrumentos y se procede a tomar las lecturas correspondientes para mantener una vigilancia continua sobre la evolución del fenómeno.

La cantidad de lluvia precipitada se mide mediante un instrumento llamado pluviómetro, que son recipientes graduados capaces de medir la cantidad de agua que cae durante un tiempo determinado. En los sistemas comunitarios quienes se encargan de la lectura, registro y transmisión de datos son los habitantes voluntarios.

La medición de los niveles de los ríos se realiza mediante reglas limnimétricas, una escala graduada que permite verificar la variación de los niveles de agua. Este instrumento puede pintarse de acuerdo con los colores de la tabla 2 para relacionarlo con los niveles de alerta. De igual manera, son los habitantes voluntarios quienes se encargan de la lectura, registro y transmisión de datos.

2.- Transmisión de datos: Con la lectura y registro de datos se procede a transmitirlos para que los especialistas realicen los cálculos pertinentes y se efectúen los pronósticos respectivos sobre un posible evento destructivo. Esta transmisión puede llevarse a cabo mediante equipos tecnológicos como satélites, sistemas computarizados, teléfonos móviles, radios entre otros, lo importante es garantizar una emisión rápida y segura de los datos.

3.- Procesamiento y análisis de datos: Una vez los datos llegan a manos de expertos se continúa con los cálculos y la elaboración de modelos que indican la posibilidad de ocurrencia de un evento adverso, estos datos se procesan con sistemas computarizados que realizan pronósticos.

4.- Evaluación de la situación y definición de alerta:

Valoración de la información y resultados de los análisis por parte de las instituciones encargadas, quienes contrastan esta información con un mapa de riesgo para establecer el daño potencial y el nivel y tipo de alerta que debe emitirse. Se pueden utilizar cuatro colores de alerta como se mostró anteriormente cada una con un significado y acciones determinadas.

- Verde: Situación normal, pero que indica que se debe prestar atención al comportamiento y evolución del evento monitoreado.
- Amarilla: Incremento de la ocurrencia de inundación, incrementa la alerta y los equipos e instituciones preparan sus planes de acción.
- Naranja: Condiciones de inundaciones críticas, se han completado las condiciones necesarias para la ocurrencia del fenómeno, es cuestión de minutos para que se manifieste.
- Roja: Llegada inminente del evento, la alerta se emite a través de las instituciones competentes y se activa el plan de emergencia y de evacuación.

5.- Difusión de alerta: Notificación de la alerta a la población, la cual debe ser clara y oportuna para garantizar la confianza de los beneficiarios. Esta alerta se podrá transmitir mediante comunicación radial, telefónica y otros medios de alerta como sirenas y alarmas que permitan establecer comunicación con el centro de operaciones y ayuden a notificar a todos los habitantes sobre la emergencia.

6.- Activación del plan de emergencia o respuesta: Puesta en marcha de los planes establecidos por las autoridades, aquí se identifican las rutas de evacuación, puntos seguros y puntos de encuentro.

2.5.2 Clasificación de los Sistemas de Alerta Temprana

En los Sistemas de Alerta temprana se pueden distinguir dos modalidades: automatizados y comunitarios (Armién,2011).

2.5.2.1 Sistemas automatizados

Utiliza tecnología que requiere conocimiento técnico experto en materia de observación y monitoreo del fenómeno, se utilizan redes telemétricas, estaciones de lluvia y niveles de los ríos, modelos hidrológicos computarizados y satélites para vigilar la cantidad de lluvia, de

manera que se puede realizar un pronóstico preciso. Este tipo de sistemas se usan en cuencas hidrográficas grandes y cuando se cuenta con el apoyo de instituciones de tipo técnico-científicas.

2.5.2.2 Sistema comunitario

Este sistema usa equipos de bajo costo y de fácil manejo que son operados por miembros de las comunidades en todo el proceso de monitoreo del evento. La comunidad organizada y su participación son los elementos fundamentales para el correcto funcionamiento del sistema, son ellos quienes identifican sus riesgos y mejoran sus capacidades para enfrentar las emergencias.

2.6 Descripción del programa HEC-HMS

2.6.1 Generalidades

Según el Manual de Usuario de HEC-HMS,2022, HEC-HMS es el acrónimo de Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System; es un programa gratuito desarrollado por Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos.

Este programa se utiliza para simular la respuesta hidrológica de una cuenca. Incorpora los modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. En la simulación se pueden hacer corridas de precipitación o de la proporción de flujo, es capaz de guardar la información de estado de la cuenca en un punto de tiempo y hacer una nueva corrida basada en información previa. Los resultados de la simulación se visualizan en el mapa de la cuenca. Se generan tablas acumulativas globales y de cada elemento, en donde se incluyen la información sobre volumen total y flujo máximo.

El modelo contiene:

- Descripción física de la cuenca
- Descripción meteorológica
- Simulación hidrológica
- Estimación de parámetros
- Análisis de simulaciones
- Conexión con SIG

2.6.2 Componentes

2.6.2.1 Modelo de cuenca

El modelo de cuenca representa la cuenca física, permite la inclusión de las características morfométricas y condición del suelo. Esta información es valiosa para formar el hidrograma total de salida.

2.6.2.2 Modelo meteorológico

Este modelo meteorológico calcula la entrada de precipitación requerida por un elemento subcuenca, es útil para escoger bajo qué serie de datos de precipitación se realizará la simulación, aquí se incluyen los hietogramas y datos de los pluviógrafos.

2.6.2.3 Especificaciones de control

Se fija el lapso de una corrida de simulación. Se establece la fecha y hora de inicio de la lluvia y el término de esta con un intervalo de tiempo conveniente para realizar los cálculos.

2.6.3 Datos de entrada

El modelo de simulación en HEC-HMS requiere de la información de cinco grupos básicos para realizar los cálculos:

- Precipitaciones de diseño
- Características del suelo
- Información morfométrica de las subcuencas
- Datos hidrológicos del proceso de transformación de lluvia en escorrentía
- Información de caudales como, por ejemplo, caudal base, etc.

Para la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo, además de la información anterior se necesitan:

- Registros concordantes de precipitación y caudales de salida (hietogramas e hidrogramas).
- Determinación de las condiciones iniciales de humedad en los suelos (difícil de lograr).

2.7 Características del programa HEC-RAS

2.7.1 Generalidades

Según el Manual de Referencia de Hidráulica de HEC-RAS, 2021, HEC-RAS es el acrónimo de Hydrologic Engineering Center y River Analysis System; es un software libre de modelización hidráulica unidimensional y bidimensional lo que implica que se puede realizar una modelización directa del efecto hidráulico de cambios de forma de sección de cruce, curvas, etc. El programa está compuesto por cuatro tipos de análisis en ríos:

- Modelización de flujo en régimen permanente
- Modelización de flujo en régimen no permanente
- Modelización del transporte de sedimentos
- Análisis de calidad de aguas

Un elemento clave es que los cuatro componentes usan una representación geométrica común y una rutina de cómputo hidráulico común. Además, el software contiene un sistema de mapeo y una amplia integración de datos espaciales. Este software es ideal para el estudio pues permite simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar el nivel del agua y así determinar las zonas de inundación. HEC-RAS está diseñado para realizar cálculos hidráulicos de una red completa de canales naturales o construidos, en una dimensión (1D), dos dimensiones (2D), o una combinación de 1D Y 2D. A continuación, se describe las capacidades en temas hidráulicos del programa.

2.7.1.1 Perfiles de Superficie de flujos de agua constante.

Este componente del sistema de modelamiento está destinado a calcular perfiles de superficie del agua para un flujo constante gradualmente variado. El sistema puede encargarse de un tramo único de un río, redes de drenaje o una red completa de canales. El componente de flujo constante es capaz de modelar flujo subcrítico, supercrítico y régimen de flujo mixto.

El esquema de cómputo se base en la solución de la ecuación unidimensional de la energía, Ecuación de Bernoulli. Las pérdidas son evaluadas por fricción usando la ecuación de Manning, también se considera las pérdidas por contracción y expansión al emplear un coeficiente para el cambio de cabeza de velocidad. La ecuación de momento es utilizada en situaciones en las cuales el perfil de la superficie del agua varía rápidamente, por ejemplo, en régimen de flujo mixto como saltos hidráulicos o confluencia de ríos. Los efectos de

obstrucciones como puentes u obras de drenaje también pueden ser considerados en los cálculos. El sistema de flujo constante está diseñado para aplicarse en el manejo de zonas de inundación para evaluar las posibles vías y llanuras de inundación.

2.7.1.2 Simulación de flujo inestable.

Este componente del sistema de modelamiento es capaz de simular un flujo inestable de una red completa de canales en una y dos dimensiones o una combinación de ambas. Esta simulación se adapta a la ecuación presentada en el modelo UNET del Dr. Robert Barkau, en la cual el componente de flujo inestable en 1D se desarrolló principalmente para un régimen de flujo subcrítico. Los cálculos de hidráulica se realizan de igual manera que en el módulo de flujo constante.

2.7.1.3 Transporte de sedimentos.

Este componente del programa se destina a la simulación del transporte de sedimentos en una y dos dimensiones, resultante de la erosión y deposición a través de periodos moderados de tiempo. El transporte de sedimentos se calcula por el tamaño de grano, permitiendo la simulación de formación de capas con distintas granulometrías. El modelo está diseñado para simular los efectos a largo plazo del desgaste ocasionado en las rocas por acción del agua y la deposición de sedimentos en el cauce de un río, el cual puede cambiar de geometría debido a los períodos de carga y descargad de flujo de agua.

2.7.1.4 Análisis de la calidad de agua.

Este módulo del sistema permite al usuario realizar un análisis de la calidad del agua fluvial. El programó HEC-RAS puede realizar un análisis detallado de la temperatura y procesar datos de calidad de los constituyentes del agua como: algas, oxígeno disuelto, fósforo disuelto, nitrógeno orgánico disuelto, entre otros.

2.7.2 Datos necesarios para la simulación en HEC-RAS

El objetivo principal del programa HEC-RAS es calcular las elevaciones de la superficie del agua en todos los lugares de interés para un conjunto dado de datos de flujo (simulación de flujo constante) o enrutando hidrogramas a través del sistema (simulación de flujo no estacionario). La información necesaria para realizar estos cálculos se divide en las

siguientes características: datos geométricos, datos de flujo constante, datos de flujo no estacionario, datos de sedimentación y datos de calidad del agua.

2.7.2.1 Datos Geométricos

La información geométrica básica consiste en establecer la conectividad del sistema del río, información de sección transversal, longitud de los cauces, coeficientes de pérdidas debidas a fricción y a contracción y expansión, información de cruce de ríos, áreas de reserva de agua, además deben incluirse la infraestructura hidráulica presente como puentes, obras de drenaje o presas.

2.7.2.2 Datos de flujo permanente

Esta información es requerida para realizar un cálculo del perfil de la superficie del agua. Los datos de flujo constante consisten en: régimen de flujo, condiciones de borde, flujo (flujo máximo o flujo en un instante determinado).

- Régimen de flujo: Los cálculos del perfil de agua comienza en una sección transversal con condiciones conocidas o asumidas y procede aguas arriba para flujo subcrítico o aguas abajo para flujo supercrítico. El régimen de flujo se especifica en la ventana “Steady Flow Analysis” de la interfase. En los casos en que el régimen de flujo cambie de subcrítico a supercrítico o viceversa el programa deberá ser ejecutado en el modo de régimen de flujo combinado.
- Condiciones de borde: Son necesarias para establecer los puntos de inicio de la superficie del agua en los extremos del río, esto se hace aguas abajo y aguas arriba, así el programa puede iniciar con el cómputo. En régimen de flujo subcrítico, las condiciones de borde son necesarias solo aguas abajo del sistema del río. Por otro lado, para flujo supercrítico las condiciones de borde se emplean solo aguas arriba del sistema. Si se trata de un flujo de régimen mixto deberán usarse condiciones de borde en ambos extremos del sistema. Existen cuatro tipos de condiciones de borde disponibles en el programa: elevaciones conocidas de los perfiles de agua, profundidad crítica, profundidad normal y curva de variación de flujo.
- Información de caudal: Se requiere en cada sección transversal para calcular el perfil de agua. El caudal se ingresa desde aguas arriba a aguas abajo para cada cauce y un dato de flujo debe incluirse.

- **Ecuación de Energía**

Dentro de un flujo horizontal de fluido, los puntos de mayor velocidad del fluido tendrán menor presión que los de menor velocidad. Se resuelve la ecuación de Bernoulli entre una sección y otra para obtener las alturas de escurrimiento.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

En donde:

$\frac{P}{\gamma}$: cabeza de presión o energía de presión por unidad de peso

$\frac{V^2}{2g}$: cabeza de velocidad o energía cinética por unidad de peso

Z: cabeza de elevación o energía potencial por unidad de peso

En la formulación de esta ecuación se asume que no hay energía suministrada o quitada del sistema. La energía puede ser entregada por una bomba, y puede ser restada por el trabajo realizado por las fuerzas de fricción por ejemplo en una turbina. Así, la ecuación de Bernoulli puede ampliarse a la siguiente ecuación.

$$\frac{\text{Energía Total en 1}}{\text{unidad de peso}} = \frac{\text{Energía Total en 2}}{\text{unidad de peso}} + \frac{\text{Pérdidas}}{\text{unidad de peso}} - \frac{\text{Energía suministrada}}{\text{unidad de peso}}$$

- **Pérdidas de carga**

Se define como la suma de las pérdidas debido a la fricción entre dos secciones y la diferencia entre cargas de velocidad entre secciones que se ponderan con coeficiente de pérdida por contracción y expansión.

- **Ecuación de Manning**

Aplicable a canales con flujo uniforme

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

Donde:

R: radio hidráulico

S: pendiente de energía

n: coeficiente de rugosidad de Manning

El coeficiente de Manning es una de las maneras de expresar la cantidad de resistencia al movimiento del agua en cauces, naturales o artificiales. Este factor puede calcularse usando el método planteado por Cowan quien plantea que este coeficiente depende de la rugosidad superficial, vegetación, irregularidad del canal, alineamiento del canal, tamaño y forma del caudal, cambio estacional, material en suspensión y carga de fondo.

$$n = (n_o + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

n_o : Coeficiente base para cauces rectos y uniforme

n_1 : valor adicional por variaciones en el cauce

n_2 : valor adicional por variaciones en el cauce

n_3 : valor adicional por obstrucciones

n_4 : valor adicional por vegetación

m_5 : factor multiplicador por sinuosidad

Los valores de n y m se obtienen de una tabla en función del material, del perímetro, irregularidad, variación de la sección transversal, efecto de las obstrucciones, vegetación y curvaturas en planta.

Tabla 3. Corrección en la determinación del coeficiente "n" de Manning

EFEECTO	Factor	Condición	Valor	Comentario
Irregularidad en la sección recta	n1	Suave	0.0	Canal muy liso
		Pequeña	0.001-0.005	Bancas algo erodadas
		Moderada	0.006-0.010	Lecho y bandas rugosas
		Fuerte	0.011-0.020	Bancas muy irregular
Variaciones en el cauce	n2	Gradual	0.0	Cambios graduales
		Alternado ocasionalmente	0.001-0.005	Cambios ocasionales de sección pequeña o grandes
		Alternado frecuentemente	0.010-0.015	Cambios frecuentes en la forma de la sección recta
Obstrucciones	n3	Despreciables	0.000-0.004	Obstrucción menor que el %5 de la sección recta
		Pocas	0.005-0.015	Obstrucciones del 5% y el 15% de la sección recta
		Algunas	0.020-0.030	Obstrucciones del 15% y el 50% de la sección
		Muchas	0.040-0.060	Obstrucciones mayor del 50% de la sección
Vegetación	n4	Pocas	0.002-0.010	Profundidad del flujo mayor a 2 veces la altura de vegetación
		Muchas	0.010-0.025	Profundidad del flujo mayor que la altura de la vegetación
		Bastante	0.025-0.050	Profundidad del flujo menor que la altura de la vegetación
		Excesiva	0.050-0.10	Profundidad del flujo menor que el 0.5 la altura de
Sinuosidad	m5	Pequeña	1.00	Sinuosidad <1.2
		Media	1.15	1.2<Sinuosidad<1.5
		Fuerte	1.30	Sinuosidad >1.5

Fuente: Chow V.T. , 1994

2.7.2.3 Datos de flujo no permanente

Necesaria para el análisis de flujo no permanente, consta de condiciones de borde (internas y externas) y de condiciones iniciales.

Condiciones de borde: Deben establecerse en todos los extremos abiertos del río que está siendo modelado. Los extremos aguas arriba pueden modelarse con hidrogramas de flujo y los extremos aguas abajo pueden modelarse con curvas de variación de flujo, hidrogramas y la ecuación de Manning.

Condiciones iniciales: Deben ser definidas por el usuario en todos los nodos del sistema del río y pueden realizarse de dos maneras. La más común es ingresar la información de flujo para cada cauce y luego el programa realizará un análisis de remanso de flujo constante. Un

segundo método es usando información de un modelo previo. Las condiciones iniciales definen la elevación inicial de la superficie del agua y las áreas de flujo

2.7.2.4 Datos del módulo control

Edición de las fechas de inicio y finalización de los datos de caudal para la simulación hidráulica, así como los intervalos de tiempo en los que se realizan los cálculos.

2.7.3 Métodos de cálculo

Por defecto el programa HEC-RAS realiza 20 interacciones y en caso de no hallar una solución compara la altura crítica con el resultado de menor error de iteraciones, y si concuerda con el régimen del problema y el error obtenido es menor a 10cm entonces el programa arroja ese valor, en caso de no cumplirse, HEC-RAS entregará altura crítica en esa sección.

3. CAPÍTULO III: MODELACIÓN DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

3.1 Estudios básicos e información del proyecto

3.1.1 Ubicación

La central hidroeléctrica San José de Minas se encuentra ubicada en la provincia de Pichincha, parroquia San José de Minas del Distrito Metropolitano de Quito entre las localidades de Alcané y Archiquela.

Coordenadas

- Latitud: 0°07'56.7" N
- Longitud: 78°26'44.6" W
- Elevación: 1710 msnm

Ilustración 14. Ubicación geográfica de la casa de máquinas de la central Hidroeléctrica San José de Minas



Fuente: Google Earth

3.1.2 Topografía

3.1.2.1 Cartas del Instituto Geográfico Militar

Para determinar la ubicación de los puntos de control del SAT y la caída neta se han empleado las Cartas Topográficas del Instituto Geográfico Militar en escala 1 a 50 000. Las cartas tienen una distancia entre curvas de nivel de 40m y de 20 m en las curvas de nivel suplementarias, lo que permite cálculos aproximados. La cartas que se usaron tiene por

nombre “Otavalo”, “Mojanda”, “San Pablo del Lago” y “Cayambe” que pertenecen a la provincia de Pichincha e Imbabura, estas cartas se adjuntan en los anexos.

3.1.2.2 Plano topográfico de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi

Para determinar la topografía de la zona de estudio se empleó los planos topográficos de los lugares antes mencionados, estos planos en formato CAD fueron facilitados por empresa Hidroeléctrica San José de Minas S.A. y se adjuntan en los anexos.

3.1.3 Hidrología

3.1.3.1 Datos de estación hidrométrica

Con el objetivo de obtener un comportamiento acertado de las lluvias se necesita de la información de las estaciones cercanas, estas estaciones pertenecen a la cuenca media del río Guayllabamba en donde se ubican las microcuencas de los ríos Perlabi y Cubi. Los datos utilizados en el Estudio Hidrológico para el Proyecto Hidroeléctrico San José de Minas, realizado por el ingeniero Zarría en 2018, contempla las lluvias mensuales del periodo 1965-2013 con información obtenida del INAMHI y del INECCEL, son de especial interés las estaciones Perucho y San José de Minas.

Tabla 4. Estaciones meteorológicas seleccionadas

ESTACIÓN		TIPO	PROVINCIA	COORDENADAS WGS84		ELEVACION	INICIO
CODIGO	NOMBRE			X	Y	msnm	
M055	QUITO AEROPUERTO	AR	PICHINCHA	501432,2	9984145,2	2794	1945
M107	CAHUASQUÍ FAO	CO	IMBABURA	531935,2	10056943,8	2335	1979
M001	INGUINCHO	CO	IMBABURA	510806,1	10028211,2	3140	1975
M326	SELVA ALEGRE	PV	IMBABURA	491594,2	10027412,2	1800	1974
M338	PERUCHO	PV/CO	PICHINCHA	00 06' 51" N	78 25' 17" W	1830	1967
M054	QUITO OBSERVATORIO	CP	PICHINCHA	499761,6	9976278,5	2820	1890
M318	APUELA INTAG	PV	IMBABURA	498493,2	10039396,6	1620	1975
M344	SAN JOSÉ DE MINAS	PV	PICHINCHA	00 10' 32" N	78 24' 30" W	2417	1974
M325	GARCÍA MORENO	PV	IMBABURA	485623,3	10025507,0	1950	1975

Fuente: M. Zarría, 2018

La simbología para las estaciones es AR: Aeronáutica, CO: Climatológica, PV: Pluviométrica, CP: Climatológica Principal.

3.1.3.1.1 Análisis de lluvias

Con base en las estadísticas de valores mensuales de precipitación de las estaciones se puede establecer que en la estación Perucho a 1,830 msnm se observa un valor medio anual de 566 mm y en San José de Minas a 2.420 msnm de 1228,5 mm. Es importante notar que en la cuenca del río Guayllabamba, las lluvias incrementan a medida que desciende la altitud, mientras que en las microcuencas de los ríos Perlabi y Cubi las lluvias aumentan conforme aumenta la altura (Zarria,2018). En la siguiente tabla se muestra las lluvias mensuales de 5 estaciones con registros que corresponden a datos del periodo 1962 a 2013.

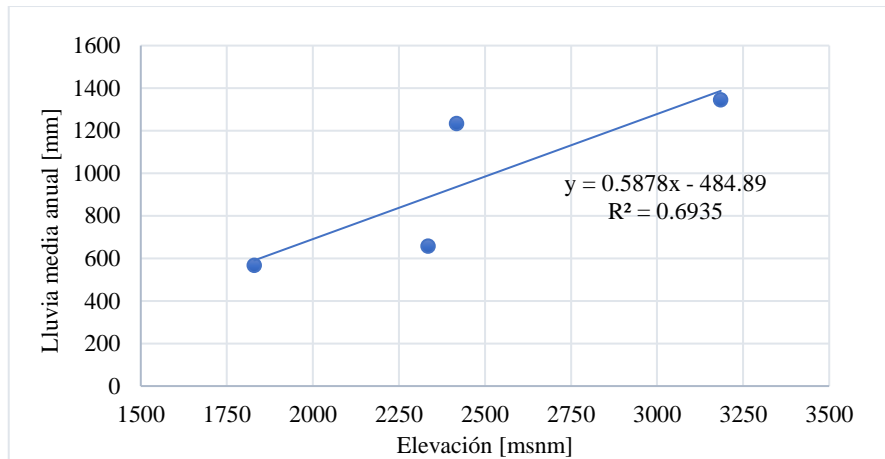
Tabla 5. Lluvias mensuales periodo 1962-2013

ESTACION		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
GARCÍA MORENO	MED	232,1	224,4	247,2	265,6	183,0	77,8	42,5	40,4	73,3	118,7	117,3	168,8	1791,1
	MÁX	452,0	454,1	403,6	480,1	389,2	268,9	129,1	130,7	198,9	398,3	426,4	362,6	480,1
	MÍN	76,4	69,5	51,2	96,4	53,7	10,8	2,6	0,0	4,5	7,9	10,2	30,7	0,0
INTAG APUELA	MED	206,2	210,7	223,5	244,3	142,1	52,4	28,3	25,5	62,3	112,4	135,2	155,3	1598,2
	MÁX	389,4	487,2	436,0	530,3	307,4	147,0	110,6	114,3	171,8	347,4	429,5	392,9	530,3
	MÍN	5,1	54,9	60,0	93,3	26,9	0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	0,0	9,4	0,0
SELVA ALEGRE	MED	233,0	229,2	252,3	256,4	177,6	83,0	47,1	43,3	76,6	118,5	125,5	174,7	1817,3
	MÁX	428,6	430,0	413,7	426,1	358,0	263,0	177,8	141,3	191,2	366,4	403,5	388,5	430,0
	MÍN	72,8	93,5	37,5	108,7	35,6	4,6	2,2	0,2	4,5	6,3	14,4	34,4	0,2
SAN JOSÉ DE MINAS	MED	121,1	140,5	140,3	168,0	118,0	62,8	37,7	30,8	66,4	101,8	124,0	121,0	1232,5
	MAX	261,2	290,9	320,4	316,8	260,2	312,0	140,3	106,0	204,5	240,1	323,9	291,6	323,9
	MÍN	12,6	37,3	15,2	49,6	20,0	1,0	0,0	0,0	6,8	1,6	20,5	19,4	0,0
PERUCHO	MED	49,0	61,6	69,5	81,4	54,5	26,7	13,9	16,4	32,9	52,8	56,5	51,8	566,9
	MAX	123,5	140,8	128,2	146,0	117,2	72,7	61,3	61,0	87,0	123,2	217,1	116,3	217,1
	MÍN	0,0	3,5	5,1	26,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5	5,9	0,0	0,0
INGUINCHO	MED	117,8	134,5	165,3	187,6	130,3	58,3	33,0	33,6	79,1	138,6	142,7	123,6	1344,4
	MÁX	347,9	319,9	614,1	334,1	253,5	195,5	151,8	88,8	184,2	264,7	360,2	288,4	614,1
	MÍN	30,2	35,7	20,7	18,1	27,0	1,6	1,2	0,0	7,6	11,8	22,0	26,8	0,0

Fuente: M. Zarria, 2018

El gráfico de perfil pluvial de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi, muestra la relación de la lluvia media anual en mm y la elevación en msnm. La tendencia de la gráfica indica que la lluvia en el centro de gravedad de la cuenca en una cota de 3145 msnm es de 1300 mm/año.

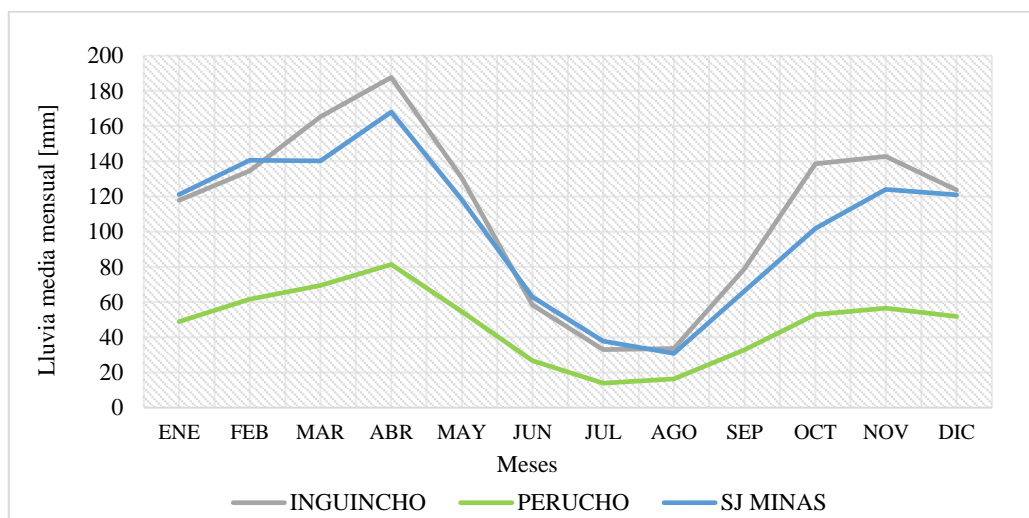
Gráfico 1. Perfil pluvial cuencas ríos Cubi y Perlabi



Fuente: M. Zarria, 2018

Para ver representada la variación de la precipitación media mensual se necesita de un histograma, aquí se aprecia que el máximo ocurre en el mes de abril y el mínimo en agosto, en consecuencia, se da un escurrimiento mayor entre octubre y mayo y un período seco entre junio y septiembre.

Gráfico 2. Histograma de lluvias medias mensuales



Fuente: M. Zarria, 2018

El período lluvioso se presenta entre enero y mayo, y es en abril cuando se presenta la precipitación máxima con lluvias medias mensuales de 180 mm. Los meses de junio a octubre conciernen al periodo seco, en donde se presentan precipitaciones menores a 15 mm e incluso se registran sequías.

3.1.3.1.2 Curva de Intensidad Duración Frecuencia (IDF)

Las curvas IDF estudian la relación de la intensidad, precipitación y sus recurrencias. Las curvas IDF representan a las duraciones en las abscisas y a la altura o intensidad de precipitación en las ordenadas. Estas curvas muestran la probabilidad de ocurrencia de intensidades de lluvia en periodos cortos para distintas duraciones y grafican los patrones de un aguacero.

En el estudio realizado por Zarria, 2018, se presentan los valores máximos registrados en San José de Minas y Perucho que superan los 100 mm correspondientes al periodo 1996-1999 y por el método estadístico de Gumbel se obtienen las intensidades de lluvias máximas diarias para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

Tabla 6. Lluvias máximas diarias

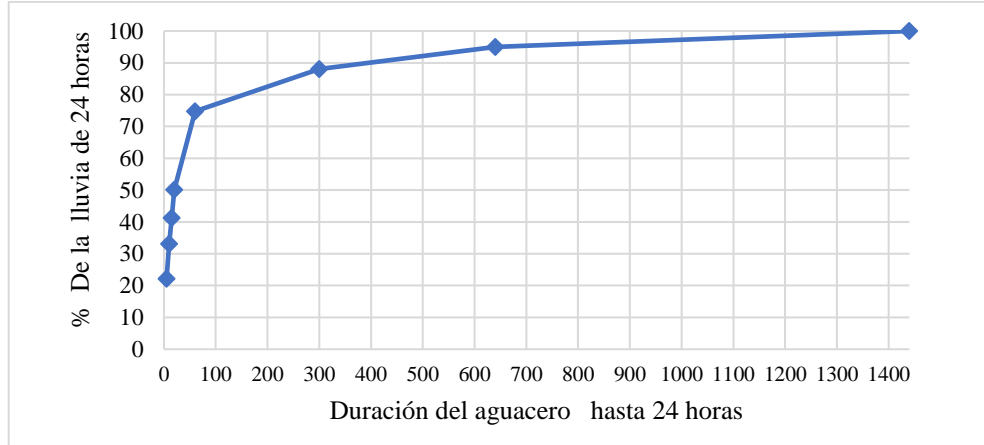
AÑO	SAN JOSÉ DE MINAS	PERUCHO
n	43	23
Máxima (mm)	138,3	53,6
Media (mm)	56,5	29,5
DS	26,63	7,98
P2 (mm)	52,4	28,3
P5 (mm)	78,6	36,7
P10 (mm)	96,0	42,2
P20 (mm)	112,7	47,5
P50 (mm)	134,4	54,4
P100 (mm)	150,6	59,6

Fuente: M. Zarria, 2018

Para duración inferior a 24 horas, el aguacero envolvente, obtenido de los registros de estaciones pluviográficas de la cuenca alta y media del Guayllabamba, (DMQ) es el que se

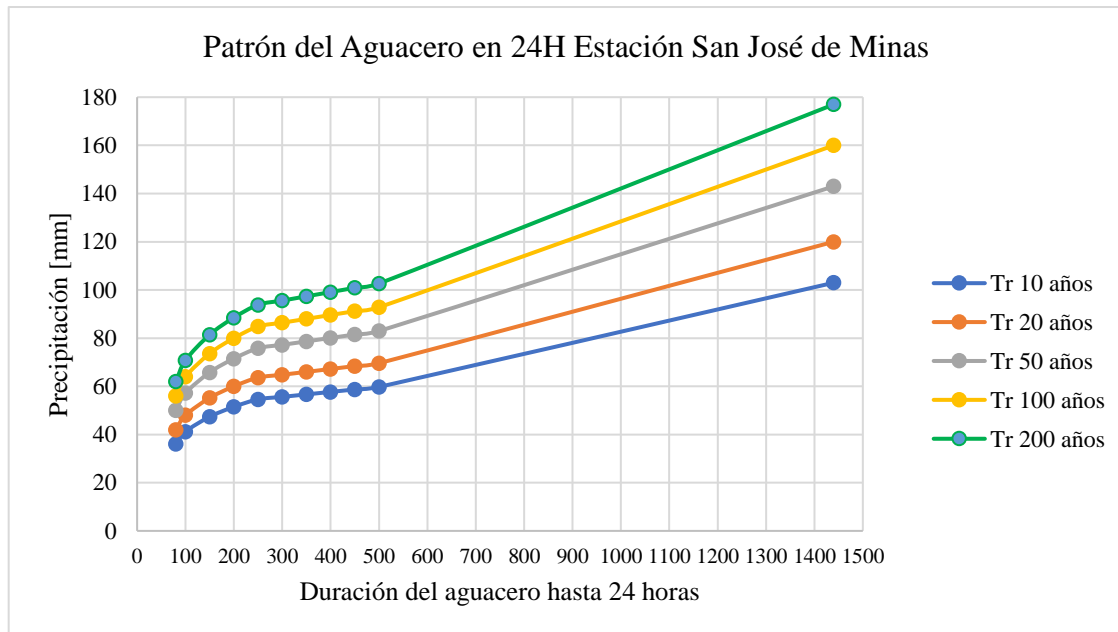
muestra en el siguiente gráfico, y cuya interpretación como ejemplo sería, que en 200 minutos llueve el 80% de lo de 24 horas.

Gráfico 3. Patrón envolvente del aguacero



Fuente: M. Zarria, 2018

Gráfico 4. Patrón del aguacero Estación San José de Minas



Fuente: M. Zarria, 2018

Según El INAMHI, 2015, en la publicación del 2015 del Estudio de Intensidades para las estaciones pueden seleccionarse como representativas para la zona de San José de Minas, las estaciones de Tabacundo y Quito para las cuales se plantea las siguientes ecuaciones.

Tabla 7. Patrón del aguacero 2015

PATRÓN DEL AGUACERO INAMHI 2015 INTENSIDAD mm/h		
	t	T PERÍODO DE RETORNO
ESTACIÓN	DURACIÓN	ECUACIÓN
TABACUNDO	30 -120 min	$i=956,7 * T^{0,074} * t^{-0,94}$
Q IÑAQUITO	30 -120 min	$i=418,7 * T^{0,219} * t^{-0,721}$

Fuente: M. Zarria, 2018

3.1.3.2 Caudal Máximo

3.1.3.2.1 Determinación de caudales máximos probables

En el estudio de M. Zarria, 2018, se procesan los caudales turbinados en la central Perlabi, de la información suministrada por el Centro de Despacho de Energía CELEC, para el periodo operativo de 2005-2016 más los caudales que escurren en la cuenca del río Cubi hasta el sitio de captación y se resumen los caudales medios mensuales.

Tabla 8. Caudales medios mensuales (m3/s) turbinados en la central Perlabi

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2005	1,12	1,35	1,34	1,26	1,41	0,87	0,64	0,61	0,79	1,02	1,06	1,02	1,04
2006	1,07	1,37	1,34	1,38	1,34	0,91	0,78	0,66	0,89	1,10	1,24	1,43	1,13
2007	1,26	1,16	1,22	1,36	1,39	0,99	0,80	0,59	0,91	1,20	1,22	1,27	1,11
2008	1,39	1,42	1,39	1,38	1,40	1,00	0,82	0,79	1,02	1,28	1,40	1,39	1,22
2009	1,41	1,41	1,35	1,31	1,28	0,83	0,77	0,80	0,99	1,23	1,21	1,24	1,15
2010	1,14	1,19	0,93	1,22	1,29	0,85	0,77	0,68	0,64	1,07	1,22	1,08	1,01
2011	1,40	1,40	1,40	1,30	1,41	0,94	0,73	0,68	0,86	1,14	1,30	1,43	1,17
2012	1,37	1,28	1,30	1,40	1,34	0,86	0,66	0,66	0,91	1,21	1,24	1,19	1,12
2013	1,13	1,41	1,17	1,14	1,37	0,92	0,63	0,62	0,79	1,02	1,07	1,03	1,02
2014	1,17	1,19	1,40	1,20	1,39	0,90	0,66	0,61	0,83	1,13	1,24	1,13	1,07
2015	1,09	1,19	1,24	1,29	1,21	0,76	0,62	0,59	0,75	0,98	1,01	0,97	0,97
2016	1,10	1,08	1,16	1,36	1,35	0,94							
PROMEDIO	1,22	1,29	1,27	1,30	1,35	0,90	0,72	0,66	0,85	1,12	1,20	1,20	1,09
MAX MM	1,41	1,42	1,40	1,40	1,41	1,00	0,82	0,80	1,02	1,28	1,40	1,43	1,22
MIN MM	1,07	1,08	0,93	1,14	1,21	0,76	0,62	0,59	0,64	0,98	1,01	0,97	0,97

Fuente: M. Zarria, 2018

En el periodo indicado, el valor medio anual es 1,09 m³/s variando a nivel mensual entre 1,22 y 0,97 m³/s. Además, el máximo caudal medio mensual turbinado es de 1,41 m³/s.

Para la determinación de los caudales en la cuenca del río Cubi se tomó en cuenta la información disponible de estudios de la cuenca del río Guayllabamba de instituciones como INAMHI, EMAAPQ, HIDROEQUINOCCIO, especialmente de las estaciones ubicadas en el curso principal como Guayllabamba AJ Cubi y Guayllabamba en Chacapata, en las que se dispone estadísticas de caudales del periodo 1965-2006.

La traslación de caudales se obtiene con factores de diferencia de áreas de drenaje, y lluvias medias anuales equivalentes, con información tomada de estudios regionales, de isolíneas de lluvias anuales y con balances lluvia – caudal. El estudio de M. Zarría, 2018 presenta la siguiente tabla para los caudales medios mensuales resultantes para el río Cubi en la toma para el periodo 1965-2013.

Tabla 9. Síntesis de caudales mensuales periodo 1965-2013 m³/s

		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
RIO GUAYLLABMABA EN CHACAPATA	MEDIO	57,2	70,2	74,1	82,5	70,8	54,0	46,6	36,3	35,3	41,9	51,3	52,7	56,1
	MAXIMO	117,0	164,4	210,8	184,4	132,2	109,8	117,2	85,2	67,1	69,9	122,8	107,2	96,4
	MINMO	29,4	24,0	30,5	34,2	35,0	28,9	23,6	21,5	21,6	20,2	21,1	20,4	32,9
RIO GUAYLLABMABA AJ CUBI	MEDIO	42,1	51,5	55,0	60,7	52,4	39,8	35,0	27,3	26,2	31,4	38,1	39,1	41,6
	MAXIMO	91,3	128,3	164,4	147,2	103,1	85,9	92,0	65,8	51,0	53,3	88,6	87,7	75,0
	MINMO	22,8	16,8	22,5	27,0	26,3	18,0	17,8	13,0	11,4	8,6	10,0	8,9	21,1
CUENCA INTERMEDIA	MEDIO	15,4	18,7	19,7	21,8	18,6	14,4	12,0	9,5	9,0	10,4	12,7	13,1	14,6
	MAXIMO	40,3	49,6	46,4	43,0	42,5	24,1	25,2	19,4	17,3	24,8	34,2	31,3	25,8
	MINMO	6,2	6,6	7,4	5,1	6,6	6,6	4,9	2,7	4,5	3,4	4,2	6,1	8,1
RIO CUBI EN LA TOMA	MEDIO	4,46	5,61	5,70	6,37	5,35	4,16	3,46	2,74	2,71	3,06	3,89	3,86	4,28
	MAXIMO	11,69	15,92	13,45	12,90	12,32	6,99	7,32	5,62	6,74	7,18	11,07	9,09	7,67
	MINMO	1,79	1,93	2,14	1,52	1,92	1,80	1,43	0,78	1,36	1,00	1,27	1,76	2,40
RIO CUBI EN LA TOMA/ DISPONIBLES (CAUDAL ECOLOGICO)	MEDIO	4,03	5,18	5,27	5,94	4,92	3,73	3,03	2,31	2,28	2,63	3,46	3,43	3,85
	MAXIMO	11,26	15,49	13,02	12,47	11,89	6,56	6,89	5,19	6,31	6,75	10,64	8,66	7,24
	MINMO	1,36	1,50	1,71	1,09	1,49	1,37	1,00	0,35	0,93	0,57	0,84	1,33	1,97
RIO CUBI + PERLABI	MEDIO	4,68	6,63	5,90	6,75	5,64	3,35	2,75	1,88	2,24	2,93	3,40	4,03	4,18
	MAXIMO	8,43	13,61	14,41	12,07	9,41	4,92	4,41	3,09	2,83	3,70	5,18	6,58	6,47
	MINMO	2,76	2,70	2,80	3,14	3,20	1,76	1,43	0,96	1,74	1,85	2,46	2,34	2,45

Fuente: M. Zarría, 2018

Con el objetivo de establecer series de caudales aprovechables y probables, se sumaron los caudales del rio Cubi deducido el caudal ecológico, a los turbinados en la central Perlabi, en el cálculo se extendió y estandarizó las series de caudales diarios y se logró un coeficiente de ajuste estadístico adecuado y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 10. Caudales medios aprovechables Cubi +Perlabi m3/s

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2005	7,34	13,61	4,97	4,84	4,06	2,72	2,38	0,96	1,87	2,44	2,66	3,49	4,28
2006	4,12	8,04	8,90	11,73	9,35	4,45	3,15	1,37	2,53	1,85	4,00	6,31	5,48
2007	4,64	3,75	4,92	7,20	6,80	4,64	2,95	1,75	1,88	2,75	2,95	3,42	3,97
2008	8,43	11,48	14,41	11,39	9,41	4,55	3,12	1,78	2,24	3,14	3,69	4,06	6,47
2009	6,98	11,08	7,47	6,52	3,90	2,32	2,79	1,82	2,37	3,00	3,52	3,53	4,61
2010	3,20	3,09	2,80	4,69	4,72	3,75	3,44	2,82	2,60	2,96	5,18	6,58	3,82
2011	5,42	7,52	7,59	12,07	7,43	4,92	4,41	3,09	2,83	3,68	3,19	5,01	5,60
2012	4,35	6,44	5,68	8,18	6,15	3,83	3,48	2,58	2,64	3,70	3,35	4,20	4,55
2013	3,08	5,59	3,74	3,94	4,97	2,89	2,58	2,05	2,28	3,46	3,38	3,47	3,45
2014	3,02	3,11	4,02	3,14	3,96	2,15	1,54	1,42	1,94	2,89	3,29	2,88	2,78
2015	2,76	3,10	3,29	3,51	3,20	1,76	1,43	1,37	1,74	2,39	2,46	2,34	2,45
2016	2,79	2,70	3,00	3,85	3,76	2,26	1,66	1,53	2,01	2,86	3,14	3,14	2,72
MEDIO	4,68	6,63	5,90	6,75	5,64	3,35	2,75	1,88	2,24	2,93	3,40	4,03	4,18

Fuente: M. Zarría, 2018

Tabla 11. Caudales mensuales probables Cubi + Perlabi m3/s

P%	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
10	8,40	13,20	14,00	11,90	9,39	4,70	4,00	2,95	2,76	3,69	4,70	3,46
20	7,15	11,26	8,30	11,53	8,00	4,60	3,45	2,73	2,61	3,52	3,83	5,80
30	6,20	9,40	7,52	9,40	7,20	4,48	3,27	2,30	2,56	3,30	3,60	4,50
40	4,63	7,55	6,00	7,60	6,40	4,00	3,14	1,94	3,43	3,60	3,40	4,12
50	4,35	6,44	4,97	6,52	4,97	3,75	2,95	1,78	2,28	2,96	3,35	3,53
60	4,11	5,50	4,47	4,76	4,40	2,80	2,68	1,65	2,14	2,88	3,24	3,48
70	3,14	3,44	3,88	4,30	4,00	3,52	2,44	1,47	1,97	2,81	3,17	3,45
80	3,05	3,10	3,50	3,88	3,92	2,28	2,00	1,39	1,90	2,50	3,00	3,20
90	2,90	3,12	3,30	3,70	3,81	2,19	1,58	1,37	1,87	2,40	2,73	2,94
100	2,76	2,70	2,80	3,14	3,20	1,76	1,43	0,96	1,74	1,85	2,46	2,34

Fuente: M. Zarría, 2018

3.1.3.2.2 Análisis de crecidas

Debido a la ausencia de datos de caudales máximos instantáneos en la cuenca, la determinación de caudales de diseño se realizó a través de dos métodos hidrológicos indirectos, basados en la intensidad de precipitación aplicando el hidrograma unitario sintético.

El hidrograma unitario sintético calculado a partir de información de lluvia y caudal es válido sólo para la cuenca y el punto de control utilizado. El hidrograma unitario sintético es desarrollado para cuencas adyacentes u otros puntos de control dentro de la misma cuenca mediante correlaciones realizadas entre las características no cambiantes de las cuencas y parámetros de los hidrogramas obtenidos (Girardi 2017).

El método seleccionado en el estudio es el sugerido por el United States Soil Conservation Service (USCS) ya que parte de un patrón de la tormenta en función de una frecuencia dada, emplea las características físicas de las cuencas para definir la relación lluvia-escorrentía. Calcula el hidrograma unitario y el de crecidas para la frecuencia correspondiente a la del aguacero seleccionado.

El procedimiento consta de los siguientes pasos:

- Obtención de la cantidad de lluvia envolvente para una duración igual al tiempo de concentración y para una frecuencia dada.
- No se aplica reducción de área de la tormenta, criterio que asegura el valor encontrado, se asume conservadoramente que la lluvia cubre toda la cuenca, a más de que se trata de cuencas pequeñas y medianas.
- Conformación del hidrograma con valores envolventes, y con bloques cada 5 minutos.
- Determinación del Número de Curva del Soil Conservation Service que considera tres variables fundamentales.
 - Tipo de cubierta vegetal: el rango de valores para las cuencas de estudio corresponde a bosque seco a semihúmedo, se ha seleccionado un valor de 68, ponderando las áreas de uso del suelo de la cuenca, correspondiente a condiciones medias.

- Condiciones de humedad antecedente de los suelos, que son aquellas producidas por lluvias y crecidas medias anuales, seleccionándose la condición II en las que los suelos permanecen al borde de la saturación, condición crítica
- Grupo de Suelos: se ha utilizado el tipo D que es el crítico ya que según las condiciones del método corresponden a suelos con un potencial de escorrentía elevado con estratos impermeables poco profundos.

A continuación, se presentan los resultados de la aplicación del modelo de crecidas, con el método del hidrograma unitario.

Tabla 12. Cálculo de caudales de crecida Método HUSCS Distribución Chicago

		ENVOLVENTE		TR=	100	(Período de retorno años)	
.(1)	.(2)	.(3)	.(4)	.(5)	.(6)	.(7)	.(8)
t=tiempo de lluvia(min)	Relación t/Tr (ti/ 60)	Intensidad (mm/H) I	p=cantidad de lluvia(mm) $I*ti/60$	p(t)=cantidad de lluvia cae cada 5min	p(t)=diferencia entre	p(t)/ptot parcial (%)	p(t)/ptot acumulad
0	0,000			0,00		0,00%	0,000
5	0,083	184,76	15,40	1,63	p45-p40	3,45%	0,035
10	0,167	134,92	22,49	1,88	p40-p35	4,00%	0,074
15	0,250	110,85	27,71	2,63	p30-p25	5,59%	0,130
20	0,333	95,20	31,73	4,02	p20-p15	8,54%	0,216
25	0,417	83,86	34,94	7,09	p10-p5	15,06%	0,366
30	0,500	75,15	37,57	15,40	p de 5 min	32,71%	0,694
35	0,583	68,20	39,78	5,23	p15-p10	11,10%	0,805
40	0,667	62,49	41,66	3,21	p25-p20	6,82%	0,873
45	0,750	57,72	43,29	2,21	p35-p30	4,69%	0,920
50	0,833	53,65	44,71	1,42	p50-p45	3,02%	0,950
55	0,917	50,14	45,96	1,25	p55-p50	2,66%	0,976
60	1,000	47,07	47,07	1,11	p60-p55	2,37%	1,000

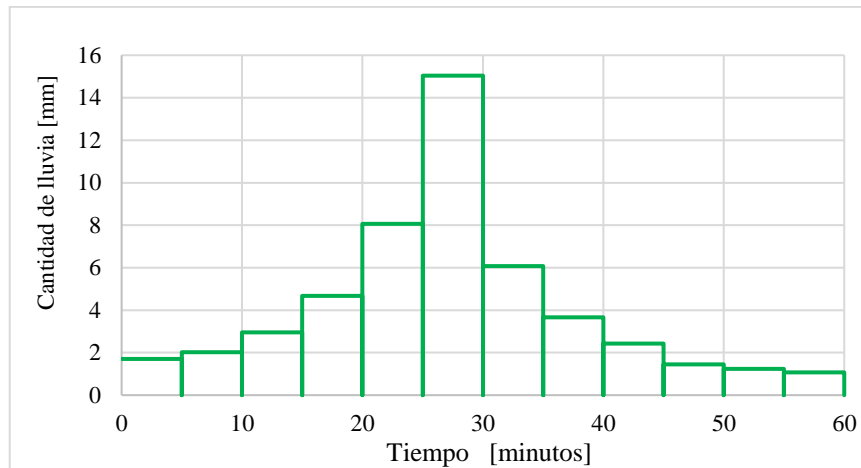
DATOS

CN =	69	Área(ha) =	14000	
S1=	22,823	Q UNIT	24,31	m3/s/mm
Tc (min)	100,0	Q PICO	133,9	m3/s

Fuente: M. Zarria, 2018

Además, se obtiene un hietograma crítico como se indica.

Gráfico 5. Hietograma TR 100 años río Cubi



Fuente: M. Zarria, 2018

El segundo método corresponde al método del Hidrograma Triangular, este método desarrollado por el US Bureau of Reclamation, tiene como fundamento hacer pasar el volumen de crecida bajo una forma triangular, este segundo método pretende respaldar los valores encontrados con el método HUSCS, los dos métodos descritos se basan en obtener la relación lluvia y caudal.

Para el caso del hidrograma triangular, utilizando las lluvias máximas para varios periodos de retorno, los resultados y los criterios son los siguientes:

Tabla 13. Caudales de crecida hidrograma triangular

SITIO	AREA km2	TC min	P/24h mm	%	C	Forma	FR	LLUVIA EFECTIVA PARA D=TC			CAUDAL PICO m3/s		
								10 años	50 años	100 años	10 años	50 años	100 años
			1	2	3	4	5						
CUBI TOMA	140	100	0,70	0,80	0,75	0,90	0,42	42,8	60,1	67,2	100	140	157

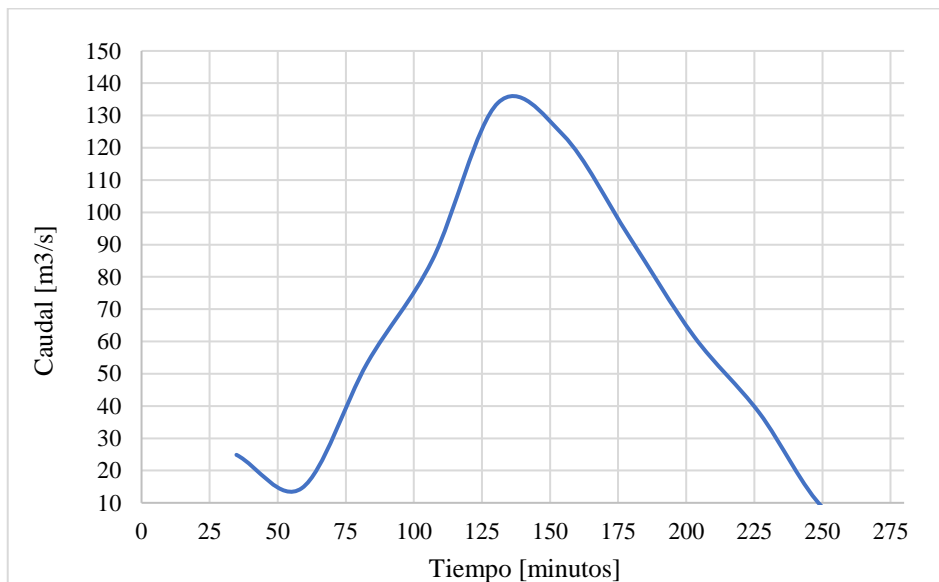
P24H Total	102	143	160
Intensidad mm/hora	2,7	3,0	3,5

- 1 Relación en función del patrón del aguacero
- 2 La tormenta cubre toda la cuenca
- 3 Pérdida por Evaporación y Filtración, Coeficiente de Escurrimiento
- 4 Diferencia entre el hidrograma triangular y curvilíneo
- 5 Factor de reducción para convertir lluvia total en lluvia efectiva

Fuente: M. Zarria, 2018

De aquí se obtiene un hidrograma de crecida como se muestra.

Gráfico 6. Hidrograma de crecidas TR 100 años río Cubi en la toma



Fuente: M. Zarria, 2018

En resumen, los valores de crecidas en m^3/s con los métodos descritos son:

Tabla 14. Resumen caudales de crecidas

MÉTODO	50 años	100 años
HUSCS	134	167
H TRIANGULAR	140	157

Fuente: M. Zarria, 2018

3.1.3.3 Caudal medio

El caudal medio es el caudal equivalente al promedio de los caudales medios durante un periodo de tiempo, el estudio presenta caudales medios mensuales del periodo 2005-2016 para el río Perlabi y del periodo 1965-2013 para el río Cubi.

El caudal medio del río Perlabi es de 1,09 m³/s, y el del río Cubi es de 4,28 m³/s.

3.1.3.4 Estimación del caudal ecológico

El caudal ecológico es el caudal que se necesita para preservar los valores ecológicos en el cauce del río. La recomendación del CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad) define el caudal ecológico como el 10% del caudal medio, así:

$$Q_{ec} = 0.10 * Q_m$$

$$Q_{ec} = 0.10 * 1.09 \text{ m}^3/\text{s}$$

El valor del caudal ecológico del río Perlabi es $Q_{ec} = 0.109 \text{ m}^3/\text{s}$

El valor del caudal ecológico del río Cubi es $Q_{ec} = 0.428 \text{ m}^3/\text{s}$

3.1.4 Meteorología

El recurso agua de la parroquia, se encuentra en la Demarcación Hidrográfica de Esmeraldas, ubicada en la Microcuenca del Sistema 06 (Esmeraldas); Cuenca 12 (Esmeraldas); Subcuenta 04 (Guayllabamba) y Microcuenca 15 (Río Cubi). Las cuencas, ubicadas en el flanco norte del río Guayllabamba, están influenciadas por factores regionales como, la circulación atmosférica identificada con el Frente de Convergencia Intertropical modelados por el relieve propio de las estribaciones de la Cordillera Occidental de Los Andes.

El mayor porcentaje del territorio de San José de Minas ocupa el río Perlabi en un 41,72%, cuya cuenca se extiende por una superficie de 87,12 km². Este río presenta una altitud de 1781 msnm y está situado cerca de Nariguara y al noreste de la Quebrada Chaquishcahuaicu.

El río Cubi tiene una altitud de 1700 msnm y está situado al oeste de la Quebrada Chaquishcahuaicu y al noroeste de la Quebrada Palmares. Este río tiene una longitud de 740 metros. La cuenca del Río Cubi cubre una superficie de 160,57 km².

La información hidrometeorológica ha sido obtenida a partir de las estaciones administradas por el INAMHI mostradas anteriormente. Las estaciones meteorológicas registran información de temperatura, humedad relativa, vientos, heliofanía, evaporación.

3.1.4.1 Temperatura

La temperatura media anual en la zona de estudio desciende a medida se incrementa la elevación, como muestra la tabla con las temperaturas en °C y la elevación en msnm.

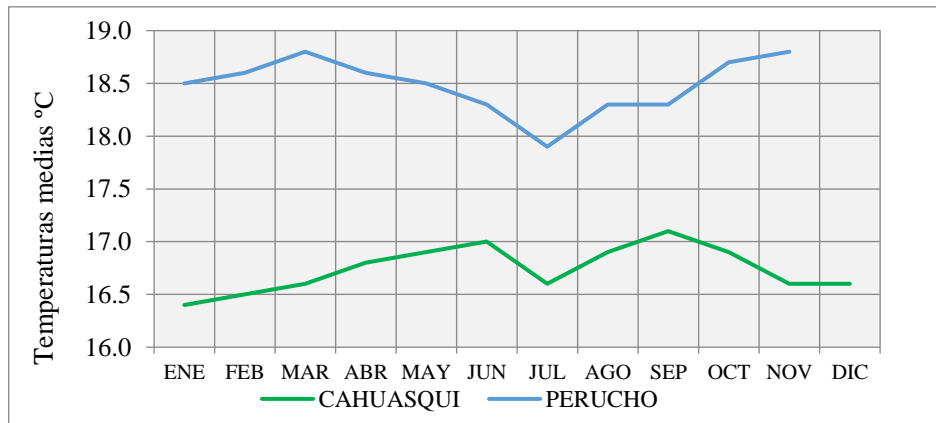
Tabla 15. Temperatura media mensuales °C

ESTACION		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	H
M023	OLMEDO	15,0	14,9	14,5	14,5	15,0	14,4	11,1	14,0	14,4	14,4	14,9	15,1	14,4	3120
M055	QUITO AER.	13,6	13,6	13,6	13,6	13,8	13,7	13,7	13,9	13,7	13,5	13,4	13,5	13,6	2794
M107	CAHUASQUI FAO	16,4	16,5	16,6	16,8	16,9	17,0	16,6	16,9	17,1	16,9	16,6	16,6	16,7	2335
M338	PERUCHO	18,5	18,6	18,8	18,6	18,5	18,3	17,9	18,3	18,3	18,7	18,8	18,6	18,5	1830
M213	LA PERLA	18,6	18,9	19,3	19,3	19,3	19,0	18,6	18,6	18,6	18,2	18,2	18,3	18,7	1410
MA2T	TABACUNDO	14,8	14,8	14,8	14,8	15,0	15,1	15,2	15,6	15,2	15,1	14,6	14,7	15,0	2790

Fuente: M. Zarria, 2018

La variación mensual es típica de la sierra, con menores valores en la estación seca o de verano, esto es en los meses de junio a septiembre y con valores mayores en la época de lluvias o invierno, como se muestra en el siguiente gráfico.

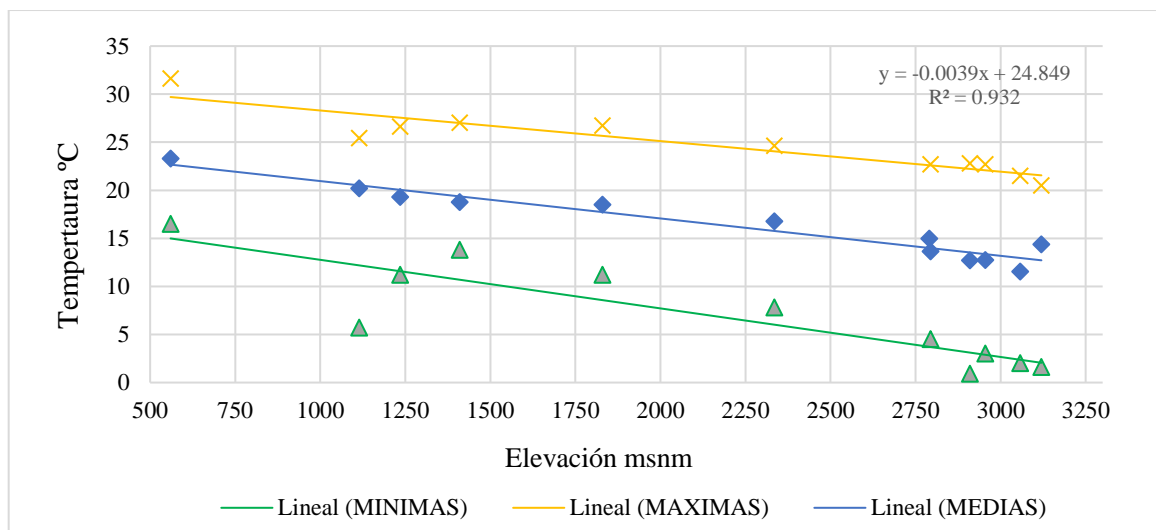
Gráfico 7. Temperaturas medias mensuales



Fuente: M. Zarria, 2018

Con esta información es posible construir una tendencia de las temperaturas para la cuenca en estudio, mostrando un perfil térmico con un rango de máximas y mínimas.

Gráfico 8. Perfil térmico zona de estudio



Fuente: M. Zarria, 2018

3.1.4.2 Humedad relativa

Es la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en el aire (humedad absoluta) y la máxima cantidad que el aire sería capaz de contener a esa temperatura (humedad absoluta de saturación). La humedad relativa medida en porcentaje con relación al aire saturado hasta el punto de rocío posee un valor medio anual de 78 %, siendo mayor en invierno hasta 80% y menor en verano 70%, variando en alrededor de 8 % como media entre los meses de invierno y verano.

Tabla 16. Humedad relativa %

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
M023 OLMEDO	81,2	81,0	82,6	82,9	80,2	80,5	78,7	77,1	79,4	79,0	80,2	80,6	80,3
M055 QUITO AER	76,8	77,4	78,5	79,6	77,0	70,7	64,1	62,4	69,0	75,3	77,2	77,0	73,8
M107 CAHUASQUI FAO	81,0	80,3	80,7	80,6	79,7	77,8	76,3	75,8	75,6	78,5	80,5	80,2	78,9
MA2T TABACUNDO	76,3	77,7	78,7	79,4	76,1	68,9	63,3	61,2	67,3	72,7	77,9	77,2	73,1

Fuente: M. Zarria, 2018

3.1.4.3 Vientos

Los vientos mensuales medios varían entre 2 y 3 m/s, con vendavales de 10 m/s. En verano los vientos son mayores y en invierno disminuyen.

Tabla 17. Velocidad del viento media mensual (m/s)

ESTACION		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
M055	QUITO AEROPUERTO	3,1	3,1	2,8	2,7	2,8	2,9	3,3	3,7	3,3	3,0	3,1	3,2	3,1
M107	CAHUASQUI FAO	1,6	1,7	1,8	1,7	1,9	2,2	2,7	3,0	2,6	2,2	1,9	2,2	2,1

Fuente: M. Zarria, 2018

3.1.4.4 Evaporación

La evaporación tanque derivada de tendencias regionales es de 1000 a 1200 mm/año con valores mayores entre diciembre y marzo coincidiendo con los de más altas temperaturas.

Tabla 18. Evaporación tanque, media mensual (mm)

ESTACION		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
M023	OLMEDO	121,9	82,5	83,5	89,6	90,4	97,4	94,2	102,3	100,0	98,7	85,8	94,6	1140,9
M107	CAHUASQUI FAO	113,1	1064,0	117,3	115,8	122,9	136,7	144,2	154,4	142,3	135,8	124,3	121,1	2491,9
MA2T	TABACUNDO	132,3	113,4	110,9	103,6	117,5	154,2	189,5	201,1	168,3	146,9	115,4	114,1	1667,2

Fuente: M. Zarria, 2018

A continuación, se muestra información meteorológica de una de las estaciones más cercanas, Estación meteorológica M0001 Inguincho, disponible en la página del INAMHI.

Coordenadas

- Latitud: 0°15'27" N
- Longitud: 78°24'28.8" W
- Elevación: 3140 msnm

EVAPORACIÓN MEDIA

1211.6 mm/año

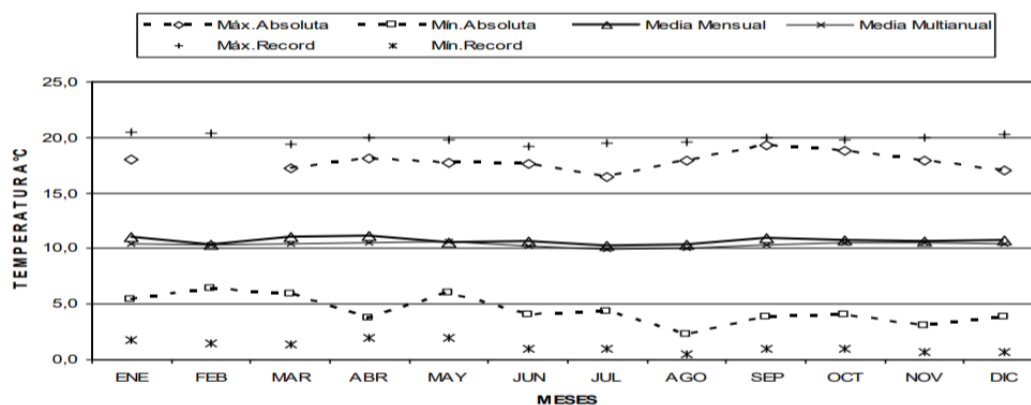
TEMPERATURA DEL AIRE

Máxima media anual

15.9 °C

Media anual	10.7 °C
Mínima media anual	5.9 °C

Ilustración 15. Distribución temporal de temperatura estación Inguincho 2013



Fuente: INAHMI

HUMEDAD

Máxima media mensual (todo el año)	90%
Media mensual (todo el año)	85%
Mínima media mensual (todo el año)	83%
Máxima diaria (madrugada)	86%
Mínima diaria (al empezar la tarde)	81%

NUBOSIDAD

En media siempre nublado entre 5/8 y 7/8.

Durante los primeros 5 meses del año existe mayor nubosidad.

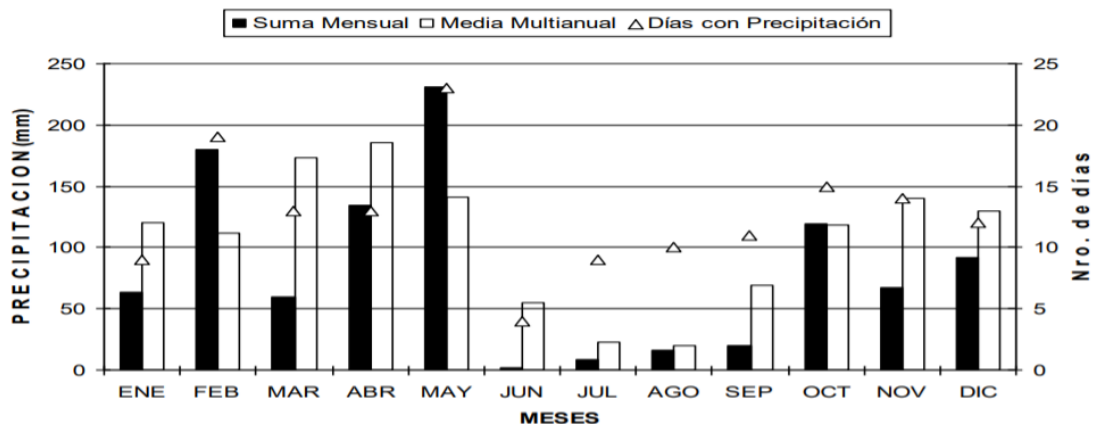
LLUVIA

Media de las cuencas	1811.60 mm/año
----------------------	----------------

No existe en la región meses ecológicamente secos.

El período lluvioso corresponde al 70% del año, siendo en abril la más alta precipitación; la intensidad baja en los meses de julio y agosto y se acrecienta desde septiembre a diciembre.

Ilustración 16. Distribución temporal de precipitación estación Inguincho 2013



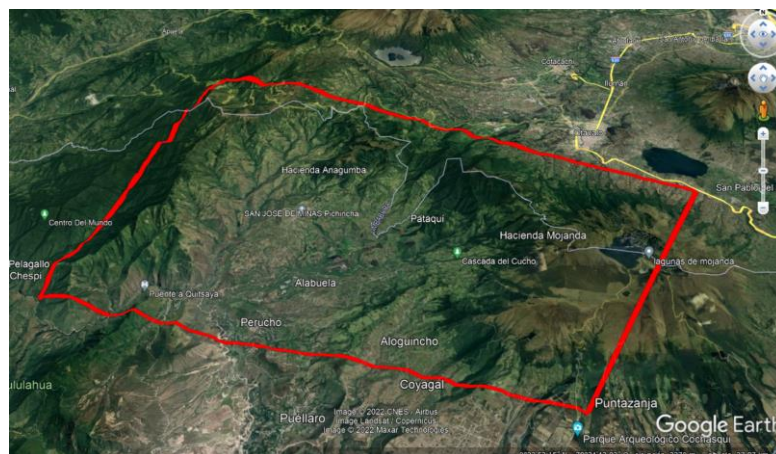
Fuente: INAHMI

3.2 Información básica para la simulación hidrológica

3.2.1 Delimitación hidrográfica de las cuencas

Para delimitar la cuenca hidrográfica de los ríos Perlabi y Cubi se empleó Google Earth, y software GIS como Global Mapper y ArcGIS. En primera instancia es pertinente conocer la zona de estudio y ubicarla mediante coordenadas en Google Earth, aquí es posible definir un área de estudio que puede ser importada a Global Mapper.

Ilustración 17. Área de estudio seleccionada en Google Earth

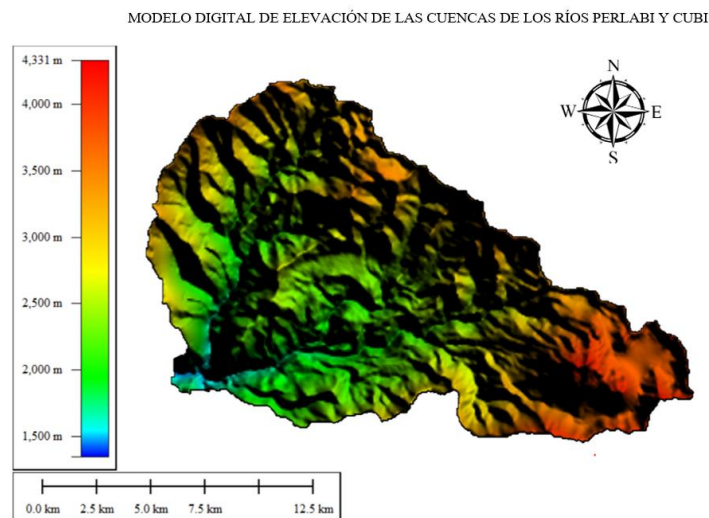


Fuente: Google Earth

En Global Mapper es viable conectar con mapas digitales que contienen diferente información como altimetrías y locaciones georreferenciadas, además el programa incorpora

una función para la delimitación de cuencas hidrográficas. Con esta información se crea un modelo digital de elevación (DEM) por sus siglas en inglés, muy útil para el estudio de cuencas hidrográficas ya que permite visualizar las cotas de un área determinada. Así se obtiene un DEM de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi.

Ilustración 18. Modelo DEM en Global Mapper de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi.



Fuente: Elaboración propia

El proceso para delimitar las cuencas se realizó en ArcGIS y mediante sus aplicaciones se obtuvo las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi con sus principales afluentes hasta el punto de captación, es decir, el punto de cierre de las cuencas, cuyas coordenadas son las siguientes:

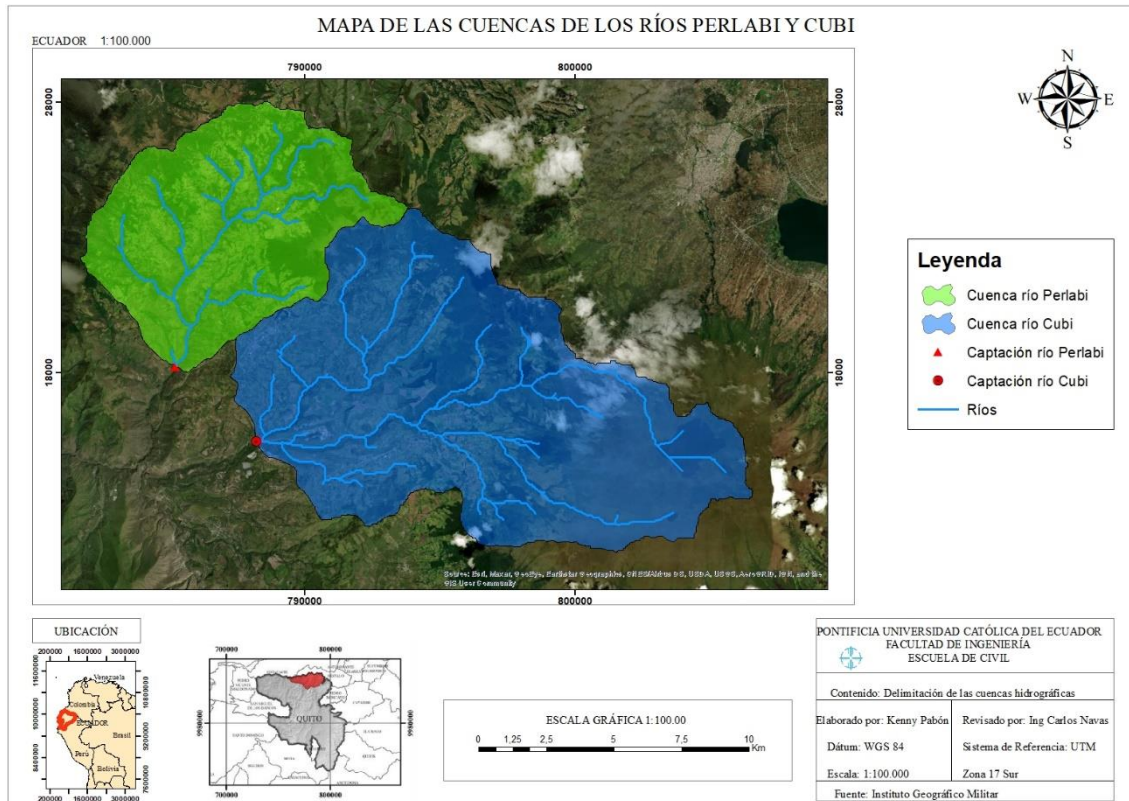
Coordenadas del punto de captación del río Perlabi

- Latitud: 18°11'60" N
- Longitud: 78°31'12" W

Coordenadas del punto de captación del río Cubi

- Latitud: 15°28'12" N
- Longitud: 78°49'12" W

Ilustración 19. Delimitación de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS



Fuente: Datos del Instituto Geográfico Militar. Elaboración propia

3.2.2 Parámetros geomorfológicos de las cuencas en estudio

Con el DEM y esta delimitación se procede a trabajar en el software ArcGIS en donde se obtuvieron los parámetros geomorfológicos que describen la estructura física de las cuencas. En el estudio de los parámetros se obtuvieron: área de la cuenca, perímetro, longitud axial de la cuenca, cotas, coordenadas de los centroides, altitudes, pendientes, curvas hipsométricas; y de la red hídrica se obtuvieron: orden de la red hídrica, longitud de la red hídrica, pendiente promedio de la red hídrica y del cauce principal y tiempo de concentración. Para la obtención de estos datos se emplearon mapas temáticos de ArcGis (dirección de flujo, acumulación de flujo, pendientes, etc). Además, con esta información se calculan los diferentes coeficientes que describen las cuencas y las redes hídricas.

La cuenca del río Perlabi abarca un área de 68,30 Km², tiene un perímetro de 38,37 Km y tiene una longitud axial medida desde la desembocadura hasta el límite extremo del parteaguas de 10,58 Km. Por otro lado, la cuenca del río Cubi cubre una superficie de 143,09 Km², posee un perímetro de 61,77 Km y su longitud axial es de 18,41 Km.

3.2.2.1 Dirección de flujo

Existen ocho direcciones de salida válidas que se corresponden con las ocho celdas adyacentes hacia donde puede ir el flujo. Este enfoque comúnmente se denomina el modelo de flujo de ocho direcciones (D8).

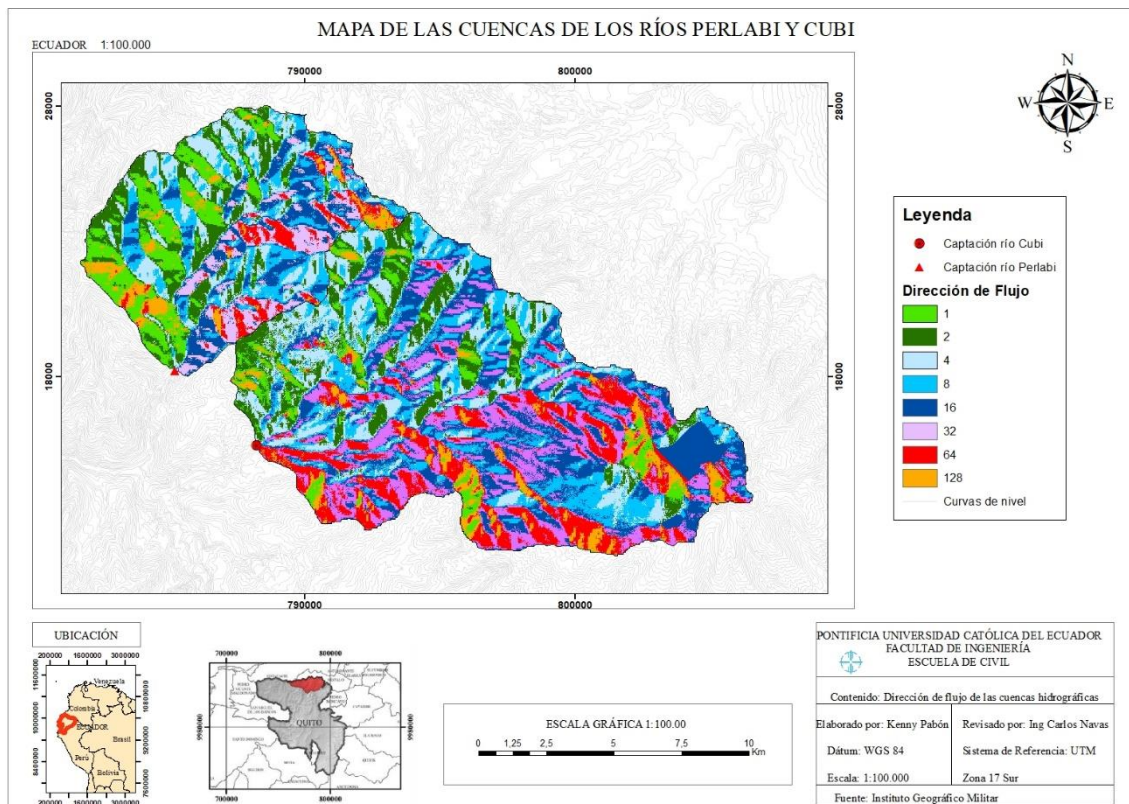
Ilustración 20. Codificación de dirección de flujo en ArcGIS



Fuente: ESRI

El siguiente mapa muestra las direcciones de flujo de las cuencas en estudio.

Ilustración 21. Dirección de flujo de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS

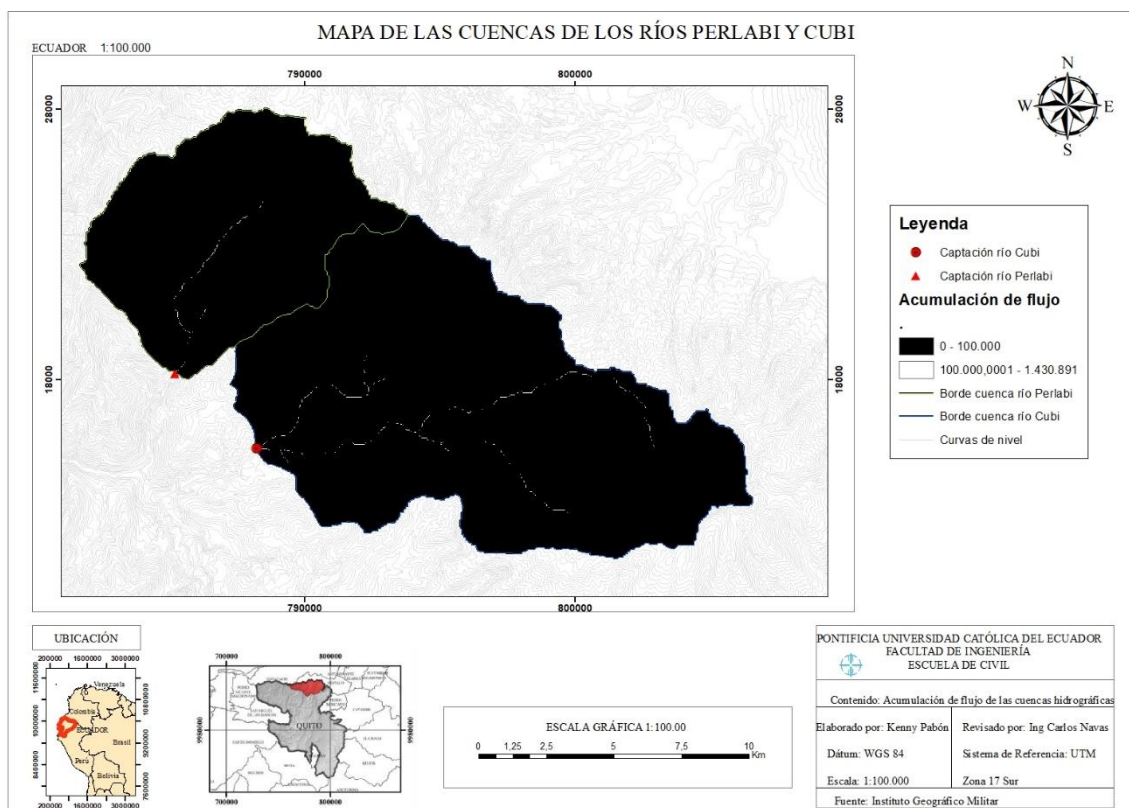


Fuente: Elaboración Propia

3.2.2.2 Acumulación de flujo

Calcula el flujo acumulado de todas las celdas que fluyen en cada celda de pendiente de salida. Un área de flujo concentrado es útil para identificar canales de arroyos y así identificar el río principal de la red hídrica. En el siguiente mapa se indica la acumulación del flujo para las cuencas en estudio.

Ilustración 22. Acumulación de flujo de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS

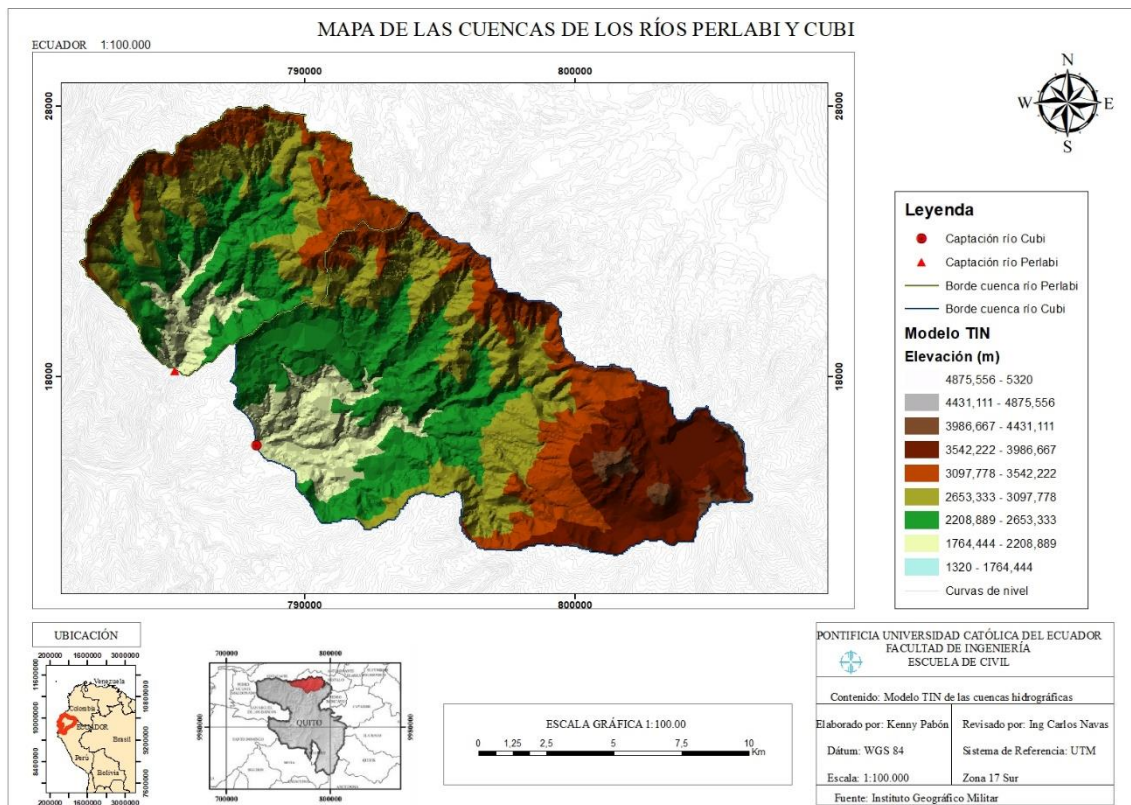


Fuente: Elaboración propia

3.2.2.3 Redes irregulares de triángulos (TIN)

Son medios digitales para representar la morfología de la superficie, permitiendo identificar cadenas montañosas y áreas planas. En el siguiente mapa se aprecia la conformación de la superficie de las cuencas hidrográficas.

Ilustración 23. Modelo TIN de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS



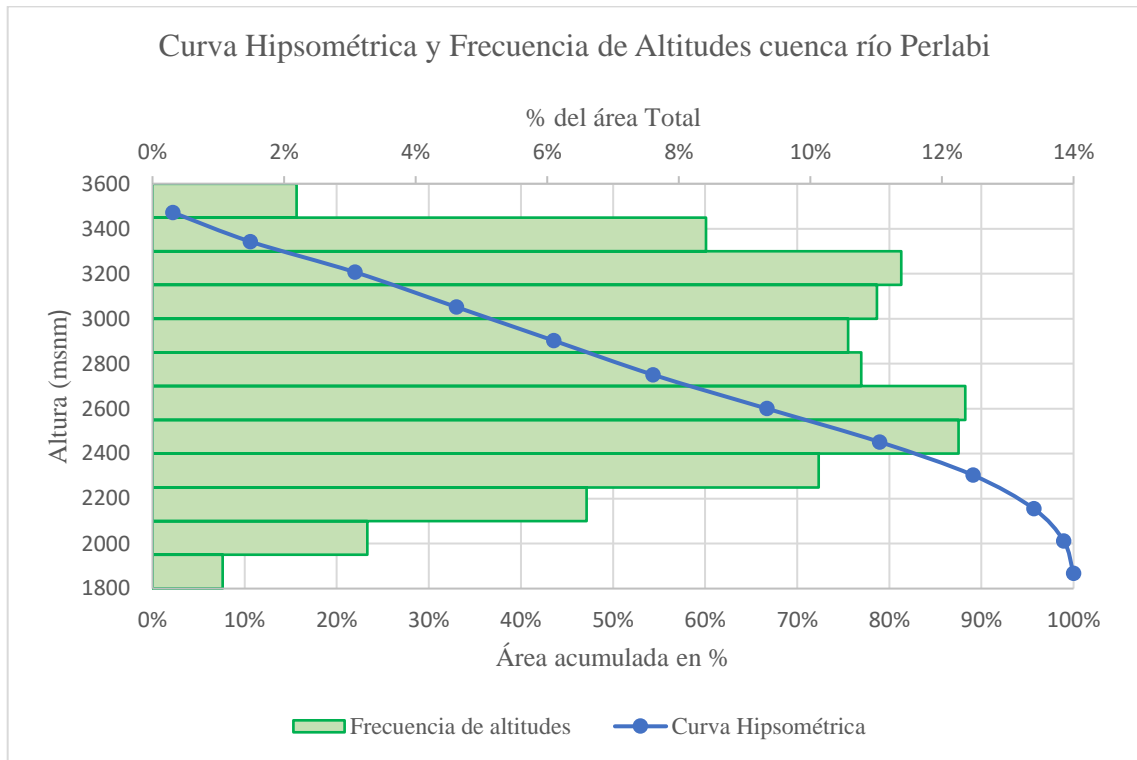
Fuente: Elaboración propia

3.2.2.4 Curva Hipsométrica

Es la representación gráfica de la variación de elevación de la cuenca, en la cual se puede apreciar la distribución de las zonas altas, medias y bajas. Se construye llevando en el eje de las abscisas, longitudes proporcionales a las superficies proyectadas en la cuenca, en Km² o en porcentaje, comprendidas entre curvas de nivel consecutivas. La curva hipsométrica representa el porcentaje de área acumulada que es igualado o excedido a una determinada cota (Monsalve, 1999).

Para el presente cálculo se dividió las elevaciones en 12 intervalos y se calculó el área entre las curvas de nivel y se obtuvieron los siguientes resultados para cada una de las cuencas.

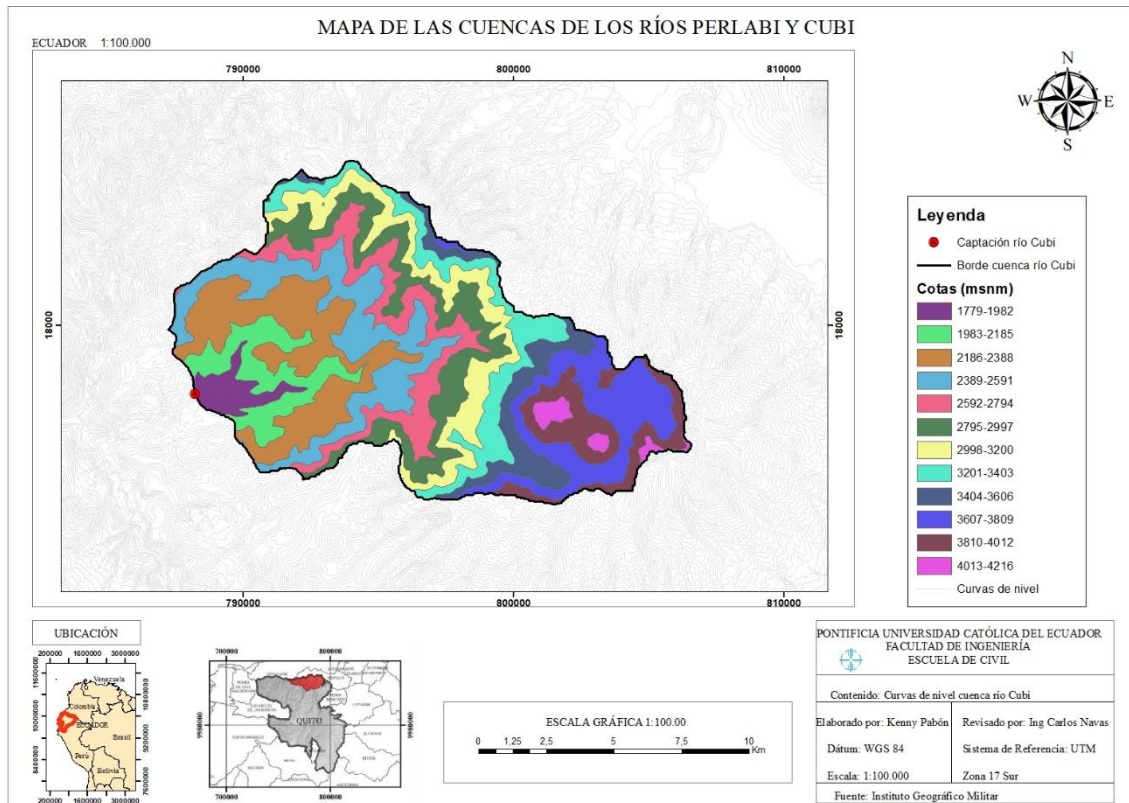
Gráfico 9. Curva Hipsométrica de la cuenca del río Perlabi



Fuente: Elaboración propia

La altitud media de la cuenca del río Perlabi es de 2821,87 msnm, su altitud más frecuente es de 2600,32 msnm y la altitud de frecuencia es media es de 2794,28 msnm. La cota mínima de la cuenca es de 1760 msnm y la cota máxima es 3600 msnm.

Ilustración 25. Curvas de nivel de la cuenca del río Cubi en ArcGIS



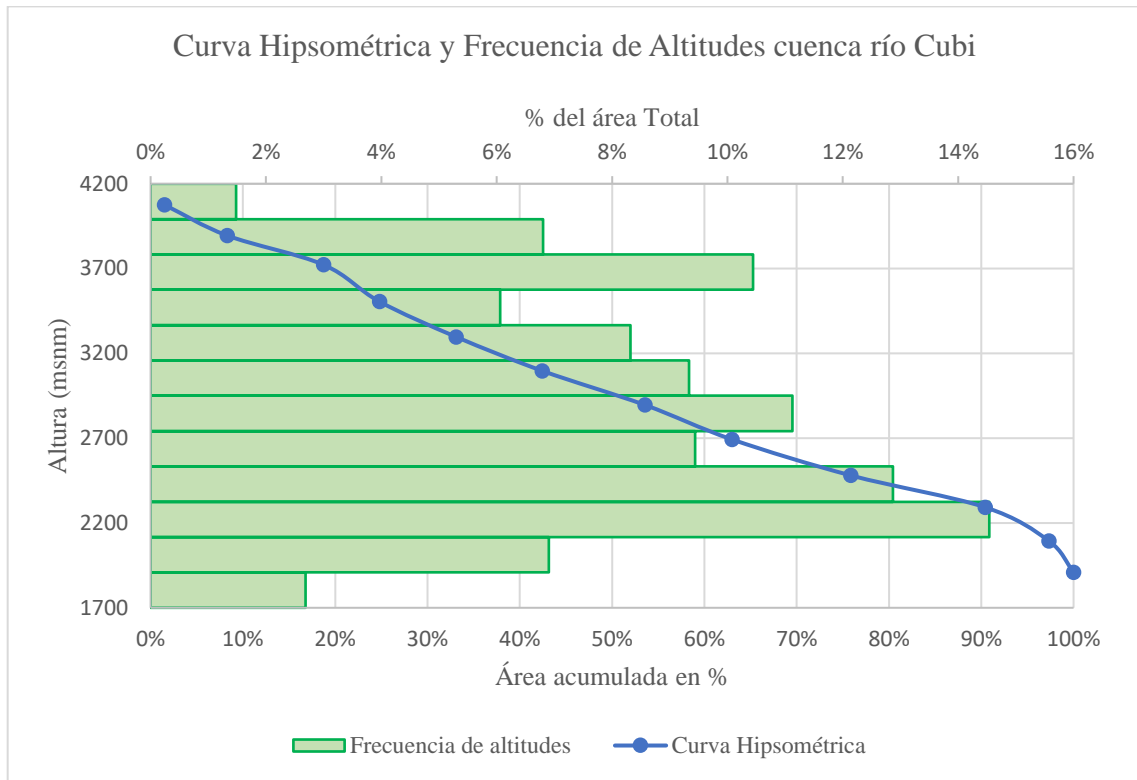
Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Resultados curva hipsométrica de la cuenca del río Cubi

N	COTAS (msnm)			Área Km2			
	Min	Max	Promedio	Intervalo	% del Total	Área acumulada	%Acumulación
1	1779	1982	1909.815	3.8456	2.688	143.0892	100
2	1983	2185	2094.806	9.8786	6.904	139.244	97.312
3	2186	2388	2292.864	20.8046	14.540	129.365	90.409
4	2389	2591	2480.256	18.4143	12.869	108.560	75.869
5	2592	2794	2692.399	13.5097	9.441	90.146	63.000
6	2795	2997	2895.851	15.9198	11.126	76.636	53.558
7	2998	3200	3096.932	13.3549	9.333	60.717	42.433
8	3201	3403	3297.219	11.8992	8.316	47.362	33.099
9	3404	3606	3505.852	8.6678	6.058	35.463	24.783
10	3607	3809	3722.748	14.9451	10.445	26.795	18.726
11	3810	4012	3895.058	9.7314	6.801	11.850	8.281
12	4013	4216	4076.236	2.1182	1.480	2.118	1.480
			Área Total	143.089	100%		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 10. Curva Hipsométrica de la cuenca del río Cubi



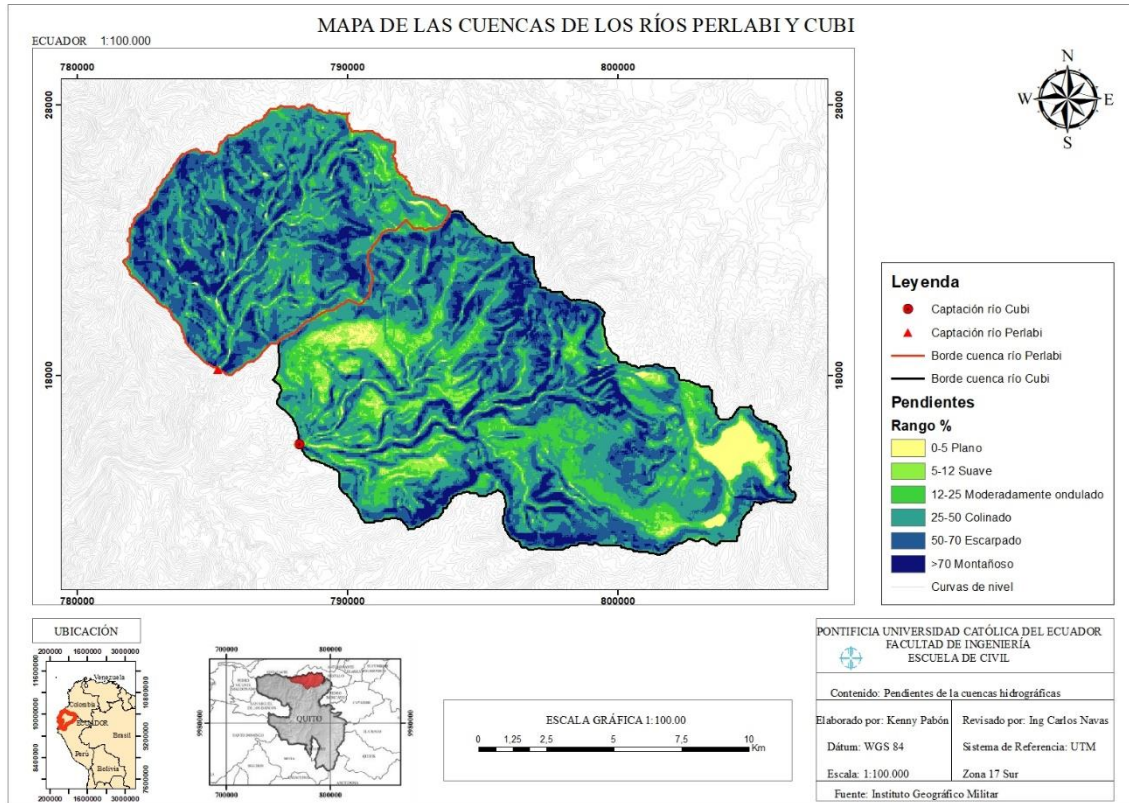
Fuente: Elaboración propia

La altitud media de la cuenca del río Cubi es de 3145,29 msnm, su altitud más frecuente es de 2292,86 msnm y la altitud de frecuencia es media es de 3012,10 msnm. La cota mínima de la cuenca es de 1764,25 msnm y la cota máxima es 4280 msnm.

3.2.2.5 Pendiente

La pendiente es una manera de medir el grado de inclinación del terreno, representa el desnivel del suelo. Si el terreno es más inclinado tendrá un valor de pendiente mayor. El siguiente mapa ilustra las pendientes de las cuencas en estudio.

Ilustración 26. Pendientes de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS



Fuente: Elaboración propia

Los rangos de pendientes para cada cuenca se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 21. Rangos de pendientes de la cuenca del río Perlabi

Rango %	Descripción	Área Km2	Porcentaje
0-5	Plano	0.4204	0.684
5-12	Suave	1.4006	2.279
12-25	Moderadamente ondulado	6.5627	10.680
25-50	Colinado	28.0704	45.683
50-70	Escarpado	24.2312	39.435
>70	Montañoso	0.7611	1.239
	TOTAL	61.4464	100

Fuente: Instituto Geográfico Militar

Tabla 22. Rangos de pendientes de la cuenca del río Cubi

Rango %	Descripción	Área Km2	Porcentaje
0-5	Plano	5.7728	4.034
5-12	Suave	9.3874	6.561
12-25	Moderadamente ondulado	26.9589	18.841
25-50	Colinado	53.5356	37.414
50-70	Escarpado	34.1412	23.860
>70	Montañoso	13.2933	9.290
	TOTAL	143.0892	100.000

Fuente: Instituto Geográfico Militar

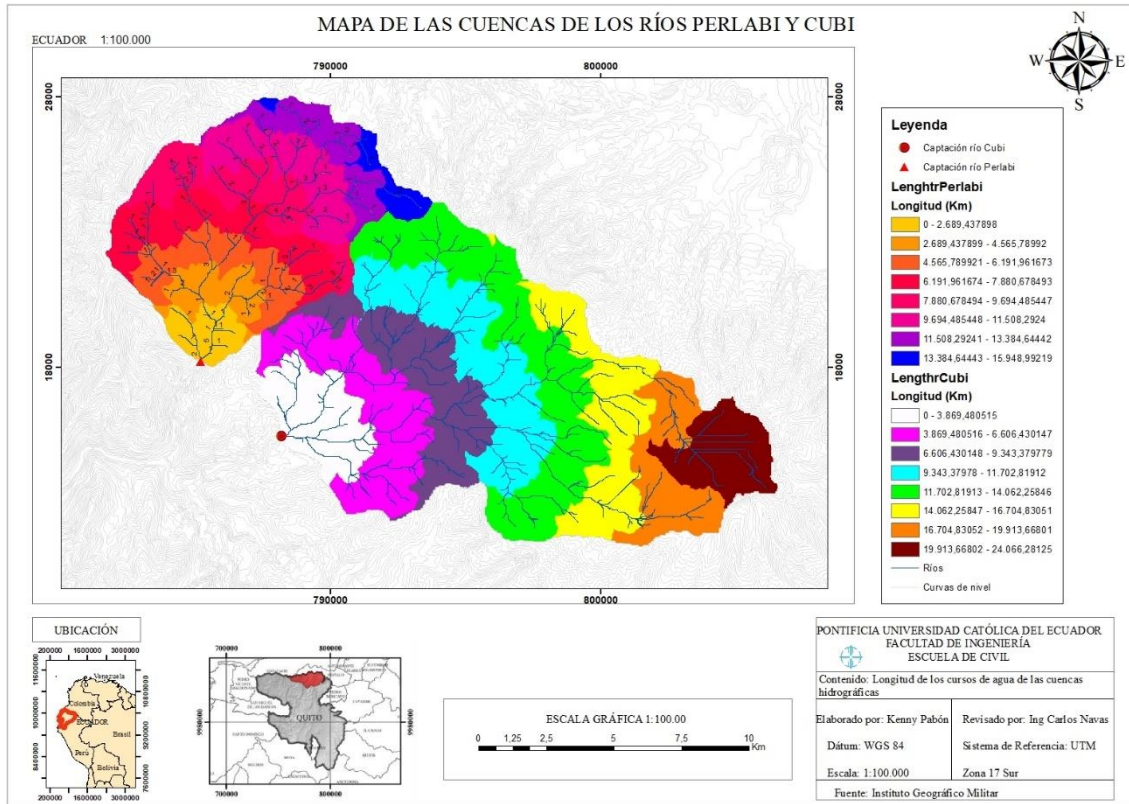
En el área de estudio el tipo de pendiente preponderante de pendiente es el colinado, de rango 25-50% con un área de 81,606 Km² que representa el 39.89% del territorio; seguido del tipo escarpado con un 28,53%. Apenas el 3.028% de la superficie es de pendiente plana. Más del 35% del territorio cuenta con un relieve de tipo irregular que van de 50-70% y mayores de 70%. La cuenca del río Perlabi tiene una pendiente promedio de 25.51% y la cuenca del río Cubi tiene una pendiente promedio de 21.33%.

3.2.3 Propiedades de la red hídrica

3.2.3.1 Longitud del curso principal

Se mide la distancia desde el punto más alejado del curso de agua hasta la desembocadura, en este caso el punto de captación. La longitud del curso principal de la red hídrica de la cuenca del río Perlabi es de 15,95 Km y posee una pendiente de 113,43 m/Km; su tiempo de concentración es de 4,07 horas. La cuenca del río Cubi tiene un curso principal con una longitud de 24,07 Km y pendiente de 101,26 m/Km, su tiempo de concentración es de 5,17 horas. El siguiente mapa muestra las longitudes de los distintos ríos que conforman la red hídrica.

Ilustración 27. Longitud de los cursos de agua de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS

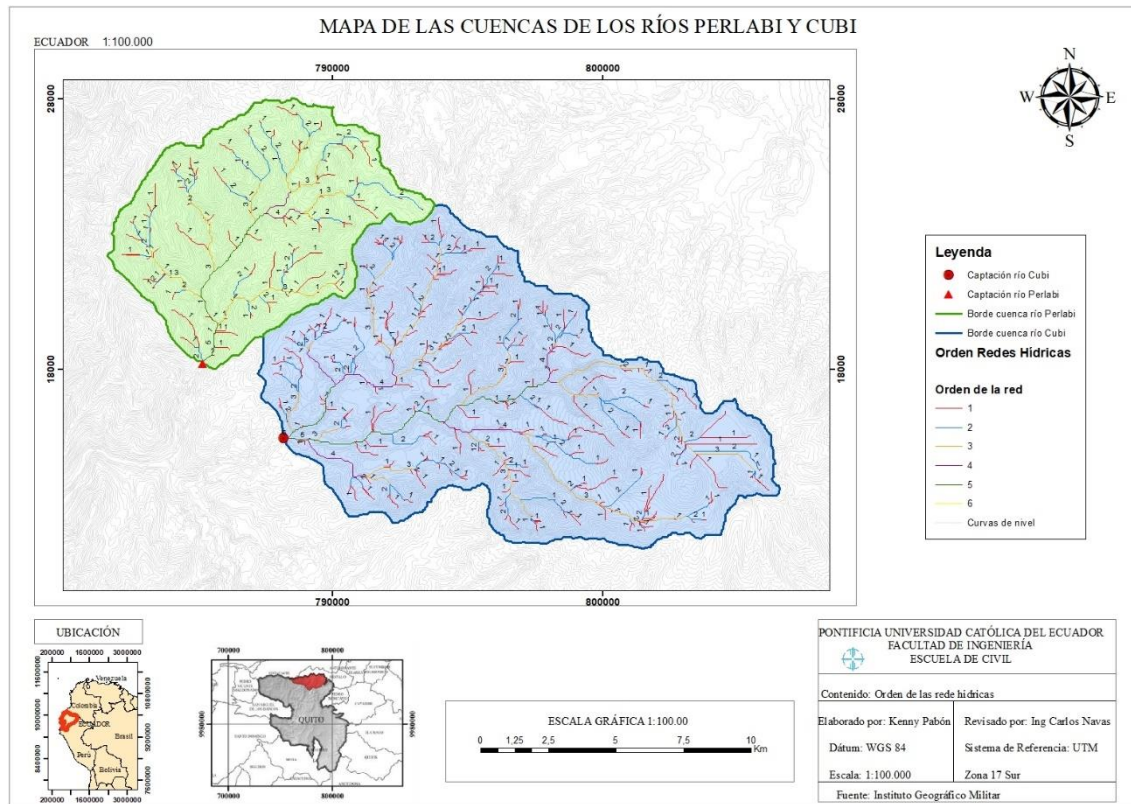


Fuente: Elaboración propia

3.2.3.2 Orden la red hídrica

La cuenca del río Perlabi posee una red hídrica de orden 5 y una longitud total de 101.09 Km con una pendiente promedio de 2.22%. Mientras que la cuenca del río Cubi tiene una red hídrica de orden 6 cuya longitud total es de 251,38 Km y posee una pendiente promedio de 1,83%, como se muestra en el siguiente mapa.

Ilustración 28. Orden de las redes hídricas de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en ArcGIS



Fuente: Elaboración propia

Las siguientes tablas muestran un resumen de los información obtenida de las cuencas.

Tabla 23. Resumen de los parámetros morfométricos de la cuenca del río Perlabi

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS CUENCA RÍO PERLABI		
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
DE LA SUPERFICIE		
Área	Km ²	68.30
Perímetro	Km	38.37
Longitud Axial	Km	10.58
Cotas		
Cota mínima	msnm	1760
Cota Máxima	msnm	3600
Centroide (WGS 1984 UTM ZONE 17S)		
X centroide	m	787453.60
Y centroide	m	10023168.36
Z centroide	msnm	2821.87
Altitud		

Altitud Media	msnm	2821.87
Altitud más frecuente	msnm	2600.32
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	2794.28
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	25.51
DE LA RED HÍDRICA		
Longitud del curso principal	Km	15.95
Orden de la red hídrica	UND	5
Longitud de la red hídrica	Km	101.09
Pendiente promedio de la red hídrica	%	2.22
Parámetros Generados		
Tiempo de concentración	Horas	0.96
Pendiente del cauce Principal	m/Km	113.43

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Resumen de los parámetros morfométricos de la cuenca del río Cubi

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS CUENCA RÍO CUBI		
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
DE LA SUPERFICIE		
Área	Km ²	143.09
Perímetro	Km	61.77
Longitud Axial	Km	18.41
Cotas		
Cota mínima	msnm	1764.25
Cota Máxima	msnm	4280
Centroide (WGS 1984 UTM ZONE 17S)		
X centroide	m	796467.96
Y centroide	m	10017290.57
Z centroide	msnm	3145.29
Altitud		
Altitud Media	msnm	3145.29
Altitud más frecuente	msnm	2292.86
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	3012.10
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	73.39
DE LA RED HÍDRICA		
Longitud del curso principal	Km	24.07
Orden de la red hídrica	UND	6
Longitud de la red hídrica	Km	251.38
Pendiente promedio de la red hídrica	%	1.83
Parámetros Generados		
Tiempo de concentración	Horas	1.41
Pendiente del cauce Principal	m/Km	101.263

Fuente: Elaboración propia

Con la información obtenida se procede a calcular los diferentes coeficientes que describen la geomorfología de las cuencas, así como también los parámetros de la densidad de drenaje para cada una de las cuencas, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 25. Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Perlabi

GEOMORFOLOGÍA PERLABI	
Coeficiente de compacidad	
$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1.300
Factor de forma de una cuenca	
$Kf = \frac{A}{L^2}$	0.610
Relación de Circularidad	
$Rci = \frac{4\pi A}{P^2}$	0.583
Relación de elongación	
$Re = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{Lm}$	0.881

Fuente: Elaboración Propia

Con esta información se puede inferir que la cuenca del río Perlabi es una cuenca oval redonda por su coeficiente de compacidad; y tiene una forma ligeramente ensanchada. La relación de circularidad indica que esta es una cuenca rectangular y su relación de elongación muestra que tiene un relieve pronunciado.

Tabla 26. Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca del río Perlabi

PARÁMETROS DE LA RED HIDROGRÁFICA	
Densidad de drenaje	
$Dd = \frac{\sum L}{A}$	1.480 Km/Km ²
Extensión media de la escorrentía	
$l = \frac{A}{4L}$	0.169 Km
Sinuosidad de las corrientes de agua	
$S = \frac{L}{Lt}$	1.507

Fuente: Elaboración propia

La densidad de drenaje indica que la cuenca del río Perlabi tiene un drenaje regular a bueno, la extensión media de la escorrentía es relativamente baja lo que contribuye a un buen drenaje, la sinuosidad indica que la velocidad de la escorrentía del agua es alta.

Tabla 27. Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Cubi

GEOMORFOLOGÍA CUBI	
Coeficiente de compacidad	
$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1.446
Factor de forma de una cuenca	
$Kf = \frac{A}{L^2}$	0.422
Relación de Circularidad	
$Rci = \frac{4\pi A}{P^2}$	0.471
Relación de elongación	
$Re = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{Lm}$	0.733

Fuente: Elaboración propia

Con esta información se puede deducir que la cuenca del río Cubi es una cuenca oval oblonga por su coeficiente de compacidad; y tiene una forma ni alargada ni ensanchada. La relación de circularidad indica que esta es una cuenca rectangular y su relación de elongación muestra que tiene un relieve pronunciado.

Tabla 28. Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca del río Cubi

PARÁMETROS DE LA RED HIDROGRÁFICA		
Densidad de drenaje		
$Dd = \frac{\sum L}{A}$	1.757	Km/Km ²
Extensión media de la escorrentía		
$l = \frac{A}{4L}$	0.142	Km
Sinuosidad de las corrientes de agua		
$S = \frac{L}{Lt}$	1.307	

Fuente: Elaboración propia

La densidad de drenaje muestra que la cuenca del río Cubi tiene un drenaje bueno, la extensión media de la escorrentía es relativamente baja lo que contribuye a un buen drenaje, la sinuosidad indica que la velocidad de la escorrentía del agua es moderada.

3.2.4 Número de curva (CN)

El número de curva (CN) es un método para calcular la precipitación efectiva producida por una tormenta en una determinada área. Este método determina la escorrentía potencial a través del conocimiento de características físicas de la cuenca tales como el tipo y tratamiento de las coberturas del suelo y su grupo hidrológico. Al parámetro número de curva (CN) se le asigna un número entero que puede variar de 0 a 100, valores cercanos a 0 representan condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que valores cercanos a 100 representan condiciones de impermeabilidad; este valor se estima a partir de la combinación

de la cobertura del suelo y el grupo hidrológico del suelo (HSG) del área de estudio, el cual se clasifica en los siguientes grupos, (Chow, 1994).

Grupo A: Aquellos suelos en los cuales su composición predominan las partículas arenosas, lo que permite que el agua se percole fácilmente y deriva en un bajo nivel de escorrentía cuando se encuentran húmedos.

Grupo B: En este grupo entran los suelos cuyas partículas son moderadamente gruesas a moderadamente finas. Se consideran suelos con una capacidad de escorrentía efectiva moderadamente baja cuando se encuentran húmedos.

Grupo C: Suelos en los que en su composición predominan partículas moderadamente finas a finas. Se caracterizan por tener un potencial de escorrentía moderadamente alto.

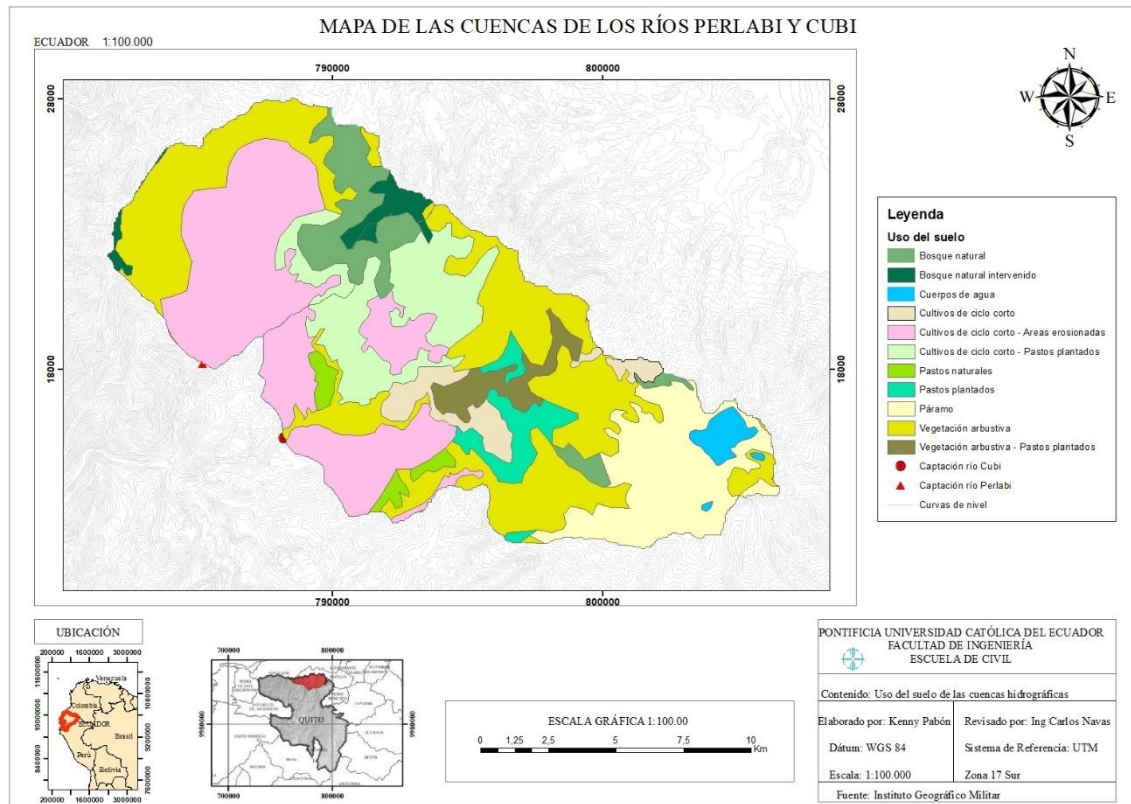
Grupo D: Aquellos suelos cuyas partículas son mayoritariamente finas (texturas arcillosas) en donde la tasa de infiltración es baja. Tienen un potencial de escorrentía alto.

3.2.4.1 Uso del suelo

El uso actual del suelo es la cobertura vegetal que cubre la superficie terrestre, esta muestra distintas características según la actividad a la que se somete el suelo, esta actividad puede variar desde cultivos o pastos hasta bosques intervenidos o nativos.

Para la caracterización de la cobertura del uso del suelo y litología de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi, se acudió a la información geográfica del portal SIGTierras del Ministerio de Agricultura y Ganadería y a través del procesamiento de los datos en la cuenca hidrográfica en el software ArcGIS se procedió a obtener las áreas por cada tipo de uso de suelo.

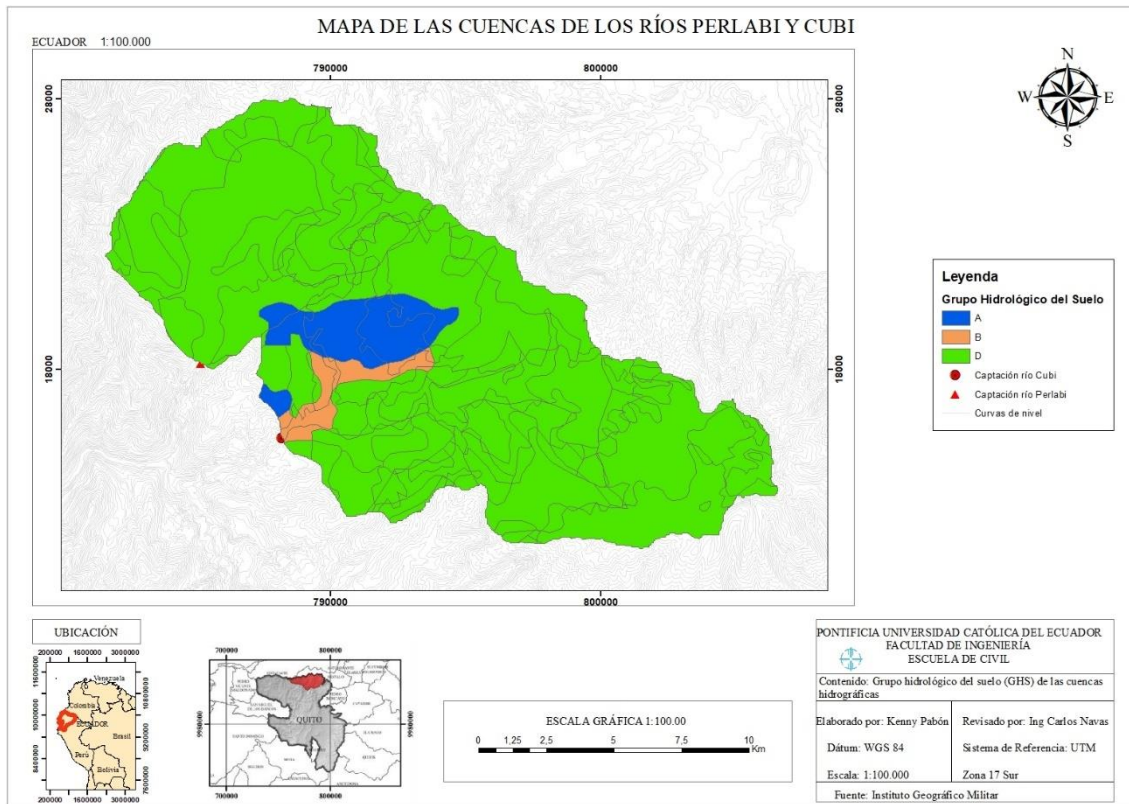
Ilustración 29. Zonificación de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en función del uso del suelo en ArcGIS



Fuente: Elaboración propia

En la parroquia parte del territorio está destinado a la conservación de bosques, la mayor parte son de relieve montañoso, escarpado y colinado que se encuentran en estado primario y de regeneración; existen también terrenos aptos para pastos y cultivos de caña de azúcar y otros sembríos. En el territorio se desarrollan actividades tradicionales como las agroforestales y pecuarias; las condiciones climáticas y las condiciones naturales del suelo permiten el cultivo de productos subtropicales como la yuca, así como productos de clima templado como el aguacate.

Ilustración 30. Zonificación de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi en función del grupo hidrológico del suelo en ArcGIS



Fuente: Elaboración propia

Según el mapa de tipos de suelos obtenido de portal SIGTierras del Ministerio de Agricultura y Ganadería en el área de estudio existen principalmente suelos del orden inceptisol y en menor cantidad entisoles y molisoles; en la parroquia San José de Minas casi el 50% de su territorio se encuentra abarcando la categoría de inceptisoles.

Los inceptisoles son suelos derivados tanto de depósitos fluviónicos como residuales, y están formados por materiales líticos de naturaleza volcánica y sedimentaria. Son superficiales a moderadamente profundos y de topografía plana a quebrada y se le asignado al grupo D (Organización de los Estados Americanos, 2006).

Los entisoles son suelos minerales derivados tanto de materiales aluviónicos como residuales, de textura moderadamente gruesa a fina, de topografía variable entre plana a extremadamente empinada se le asignado al grupo B (Organización de los Estados Americanos, 2006).

Los molisoles son suelos superficiales a moderadamente profundos, con epipedón móllico, desarrollados de materiales volcánicos y sedimentarios; tienen horizontes superficiales oscurecidos, estructurados en gránulos bien desarrollados de consistencia friable y dotados suficientemente de bases, principalmente Ca y Mg, se le asignado el grupo A (Organización de los Estados Americanos, 2006).

Tabla 29. Cálculo de CN(II), CN(III) y CN(I) en función de HSG y uso del suelo de la cuenca del río Perlabi.

Uso del Suelo	Área Km2	CN	CN (III)	CN(I)
Bosque natural	12.337	78	89	60
Bosque natural intervenido	17.715	78	89	60
Cultivos de ciclo corto áreas erosionadas	39.444	77	89	58
Cultivos de ciclo corto pastos plantados	0.127	87	94	74
Páramo	0.006	100	100	100
Pastos naturales	0.282	87	94	74
Vegetación arbustiva	0.921	87	94	74

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Cálculo de CN(II), CN(III) y CN(I) en función de HSG y uso del suelo de la cuenca del río Cubi.

Uso del Suelo	Área Km2	CN	CN (III)	CN(I)
Bosque natural	0.234	78	89	60
Bosque natural intervenido	0.456	78	89	60
Cuerpos de agua	0.292	100	100	100
Cultivos de ciclo corto	11.285	87	94	74
Cultivos de ciclo corto áreas erosionadas	39.926	87	94	74
Cultivos de ciclo corto pastos plantados	23.627	77	89	58
Pastos naturales	3.130	87	94	74
Pastos plantados	9.839	87	94	74
Vegetación arbustiva	9.545	87	94	74
Vegetación arbustiva pastos plantados	6.083	87	94	74
Páramos	67.572	100	100	100

Fuente: Elaboración propia

El cálculo del número de curva para condiciones secas $CN(I)$ y condiciones húmedas $CN(III)$ se calculan a través de las siguientes ecuaciones (Chow et al., 1994).

$$CN(III) = \frac{23 CN}{10 + 0.13 CN}$$

$$CN(I) = \frac{4,2 CN}{10 - 0.058 CN}$$

4. CAPÍTULO IV: MODELACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN JOSÉ DE MINAS CON HEC

4.1 Programas HEC

4.1.1 Módulo de hidrología HEC-HMS

El módulo HEC-HMS está diseñado para representar procesos de lluvia-escorrentamiento en sistemas de drenaje dendríticos de cuencas. Se emplea en estudios de disponibilidad de agua, pronósticos de flujo, drenaje en zonas urbanas, futuras urbanizaciones, disminución del perjuicio por inundaciones, etc.

4.1.2 Módulo de hidráulica HEC-RAS

El módulo HEC-RAS permite desarrollar cálculos para determinar el perfil de la superficie libre en flujo permanente y flujo no permanente e incluye el transporte de sedimentos. En este módulo se simula los flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar el nivel del agua por lo que uno de sus objetivos principales es realizar estudios de inundabilidad.

4.2 Simulación hidrológica e hidráulica

4.2.1 Generalidades

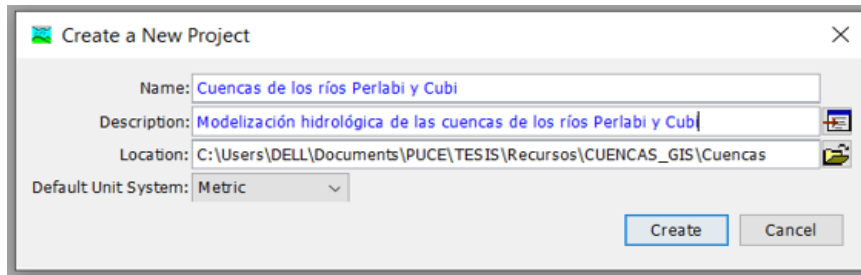
Luego de la caracterización morfológica de las cuencas que permite conocer sus condiciones en cuanto a una posible inundación, se procede a la modelación hidrológica en la cual se determina el comportamiento hidrológico de la cuenca en donde se distingue el tipo de suelo y su cobertura. Los datos hidrogeológicos y el tipo de suelo son fundamentales para el modelado hidrológico en HEC-HMS. Partiendo de los caudales obtenidos mediante el modelo hidrológico se realiza el modelo hidráulico en el software HEC-RAS para los diferentes periodos de retorno y se obtienen los polígonos de inundación de las cuencas. Con ayuda de esta zonificación se pueden llevar a cabo propuestas para la mitigación de desastres por consecuencia de las inundaciones.

4.2.2 Ingreso de datos hidrológicos

En el módulo HEC-HMS es posible ingresar el modelo digital de elevación (DEM) de las cuencas y así obtener un modelo georreferenciado de las cuencas en este programa. Esto se realiza mediante el programa Global Mapper que permite exportar el DEM en un formato

de proyección (.prj) capaz de guardar estas características. Para ello se inicia creando un nuevo proyecto con File/New/Create New Project. Así asignamos un nombre al proyecto y se especifica el destino donde se guardarán todos los archivos asociados al proyecto.

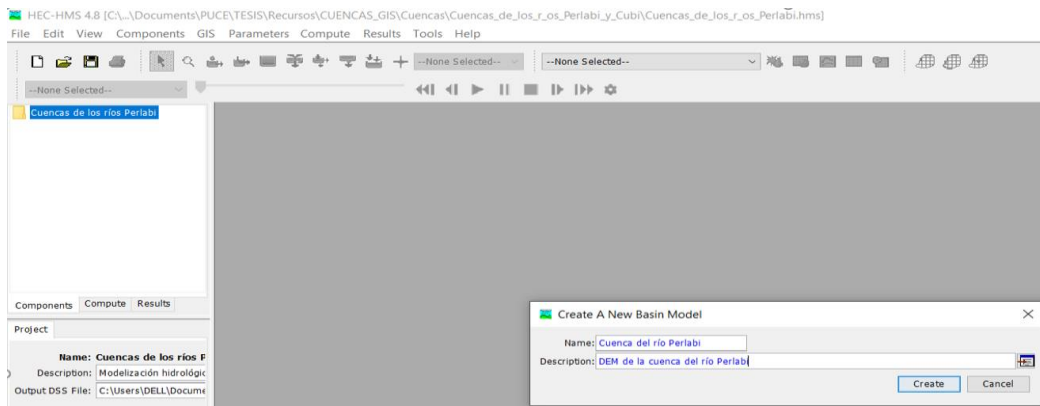
Ilustración 31. Creación de nuevo proyecto en HEC-HMS



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

Para crear el modelo de cuenca (Basin Model) se sigue la ruta Components/ Create Component/Create Basin Model y se le asigna el nombre correspondiente.

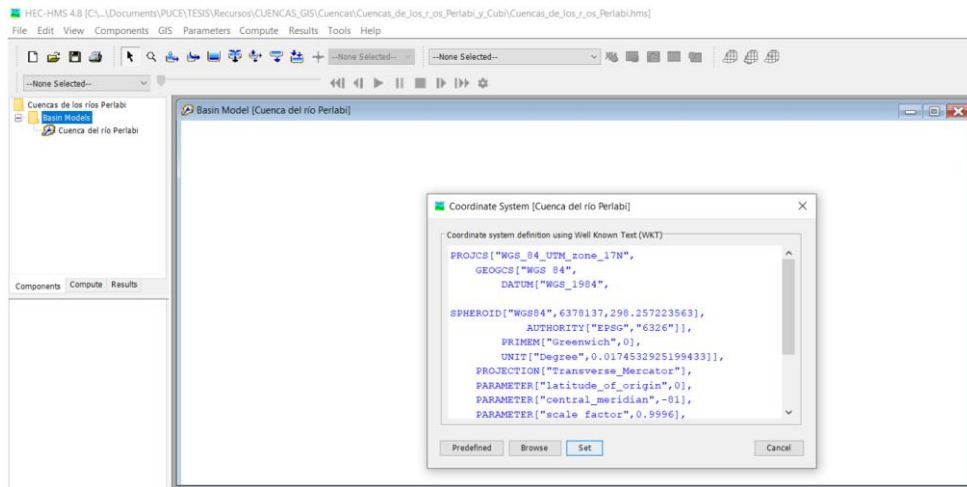
Ilustración 32. Creación de Basin Model



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

El sistema de coordenadas se define con la ruta GIS/Coordinate System y se coloca las coordenadas del modelo DEM de cada cuenca.

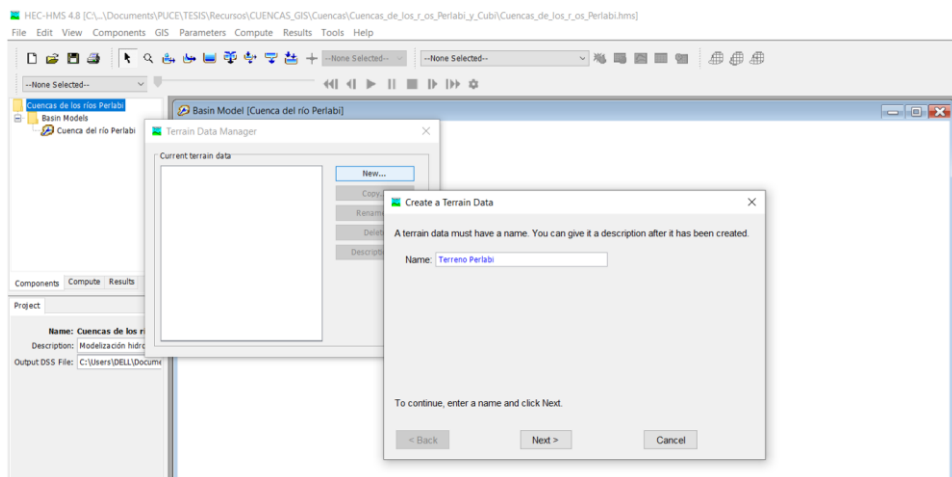
Ilustración 33. Definición del sistema de coordenadas HEC-HMS



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

Luego se debe crear el terreno mediante la ruta Components/ Terrain Data Manager/ New y seleccionar el modelo DEM para cada cuenca.

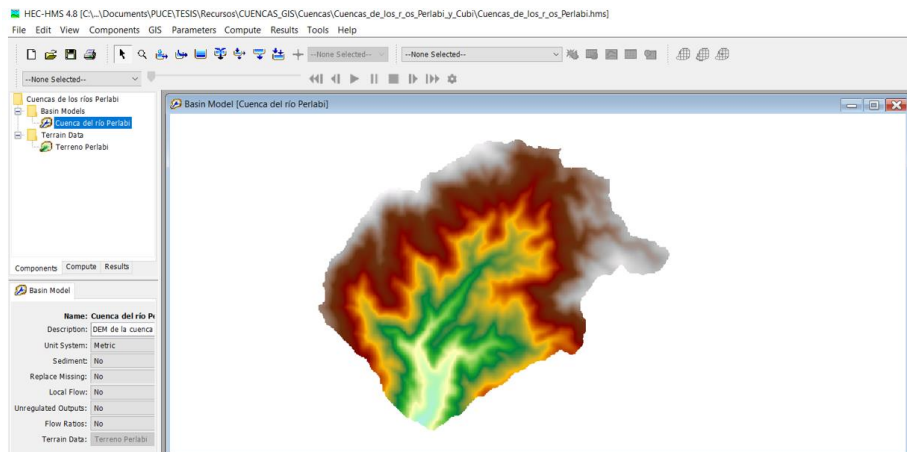
Ilustración 34. Creación del terreno en HEC-HMS



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

Una vez creado el campo se lo asigna al modelo de la cuenca y se visualiza el modelo DEM de la cuenca en el programa HEC-HMS.

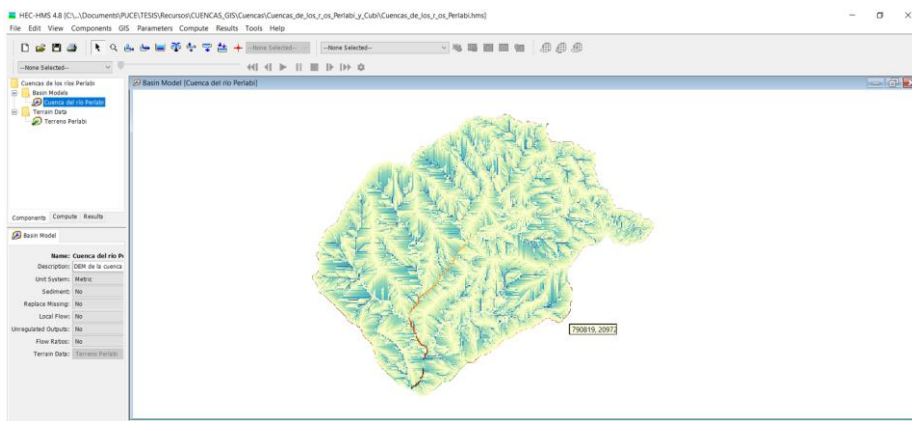
Ilustración 35. Modelo DEM en HEC-HMS



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

Con la herramienta GIS que incorpora el HEC-HMS se procede a modelar la cuenca. Se siguen las rutas GIS/Preprocess Sinks para llenar los puntos bajos del DEM y así permitir un drenaje sobre un punto de descarga; la ruta GIS/ Preprocess Drainage para crear una primera red de drenaje; la ruta GIS/ Identify Streams para identificar los cauces en donde hay que definir el área de las subcuencas, en este caso 5 Km².

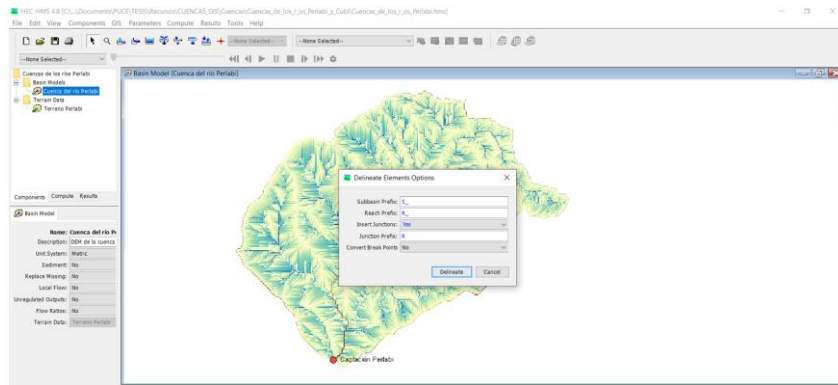
Ilustración 36. Modelo de la cuenca con la herramienta GIS de HEC-HMS



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

Para delimitar las subcuencas es necesario crear un punto de cierre, el punto de captación, y luego se sigue la ruta GIS/Delineate Elements y se definen los nombres de cada parámetro.

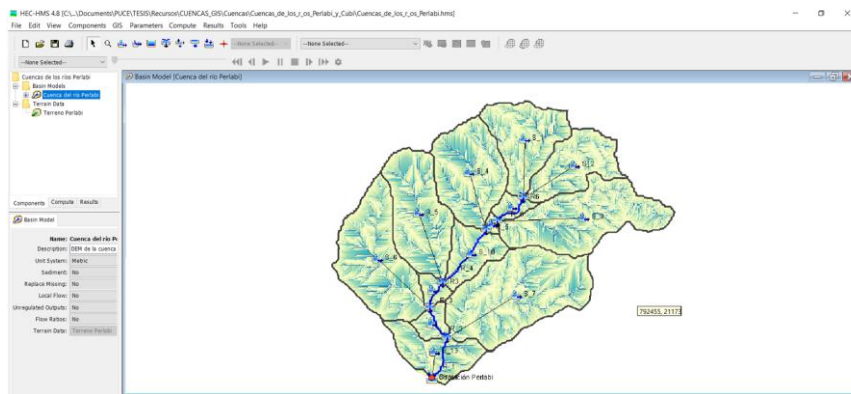
Ilustración 37. Delimitación de las subcuencas en HEC-HMS



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

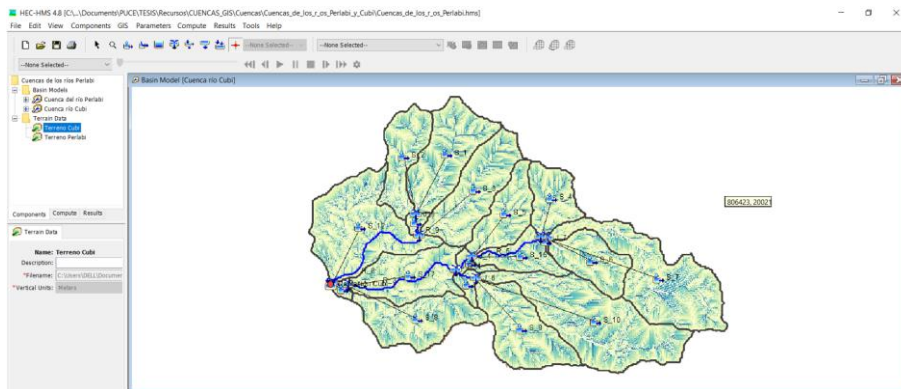
Se obtiene el modelo delimitado y se realiza el mismo procedimiento para ambas cuencas.

Ilustración 38. Modelo de la cuenca del río Perlabi en HEC-HMS



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

Ilustración 39. Modelo de la cuenca del río Cubi en HEC-HMS

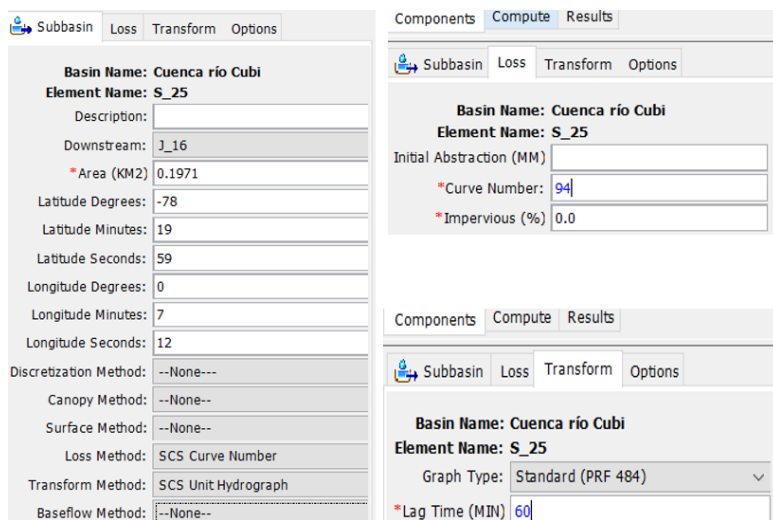


Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

Se debe ajustar las subcuencas y elegir los métodos de cálculo que se desea utilizar en cada fase de cálculo. Para ello en cada subcuenca que se creó se definen estos parámetros. Ya que se cuenta con la información del número de curva CN, para el método de pérdidas “Loss Method” que define las ecuaciones utilizadas en la simulación HMS para separar los volúmenes de precipitación del exceso de escorrentía, se selecciona “SCS Curve Number”, para calcular la precipitación neta. En “Transform Method” se elige “SCS Unit Hydrograph” para transformar la precipitación neta en caudal. En “Baseflow Method” se selecciona “None” puesto que no existe un flujo base.

El método del SCS asume la hipótesis de que la abstracción inicial es del 20% de la abstracción máxima del suelo, en HMS solo es necesario introducir el valor de CN y el programa calculará la precipitación neta mediante la relación indicada. Para el valor de “Lag Time” se emplea el 60% del tiempo de concentración, siendo de 35 minutos para la cuenca del río Perlabi y de 60 minutos para la cuenca del río Cubi.

Ilustración 40. Ajuste métodos de cálculo en HEC-HMS



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

Para ingresar los datos pluviométricos de los pluviógrafos de los cuales se tiene información del estudio hidrológico de Zarria, 2018, se sigue la ruta Components/ Time Series Data Manager/Data Type: Precipitation Gages/New y se ingresa la información disponible, en este caso se dispone de precipitaciones cada 5 minutos en el intervalo de 1 hora para tiempos de retorno de 50 años y de 100 años.

Ilustración 41. Ingreso de datos pluviométricos HEC-HMS

Time (ddMMMYYYY, HH:MM)	Precipitation (MM)
30ene.2022, 00:00	
30ene.2022, 00:05	1.63
30ene.2022, 00:10	1.88
30ene.2022, 00:15	2.63
30ene.2022, 00:20	4.02
30ene.2022, 00:25	7.09
30ene.2022, 00:30	15.40
30ene.2022, 00:35	5.23
30ene.2022, 00:40	3.21
30ene.2022, 00:45	2.21
30ene.2022, 00:50	1.42
30ene.2022, 00:55	1.25
30ene.2022, 01:00	1.11

Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

El modelo meteorológico se crea con la ruta Components/ Meteorologic Model Manager/ New. Se especifica el tipo de precipitación, en este caso el obtenido de los datos del pluviómetro, “Specified Hyetograph y se asigna el modelo a todas las subcuencas.

Ilustración 42. Modelo meteorológico HEC-HMS

Subbasin Name	Gage
S_1	Pluv 1
S_10	Pluv 1
S_11	Pluv 1
S_12	Pluv 1
S_13	Pluv 1
S_14	Pluv 1
S_15	Pluv 1
S_16	Pluv 1
S_17	Pluv 1
S_18	Pluv 1
S_19	Pluv 1
S_2	Pluv 1
S_20	Pluv 1
S_21	Pluv 1
S_22	Pluv 1
S_23	Pluv 1

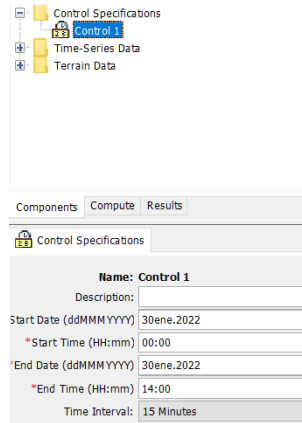
Meteorology Model		Basins	Options
Met Name: Met 1			
Basin Model		Include Subbasins	
Cuenca río Cubi		Yes	
Cuenca río Perlabi		Yes	

Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

Se definen las especificaciones de control para indicar el periodo de tiempo en el que el software realiza los cálculos y el incremento de tiempo a utilizarse. Se lo realiza mediante la

ruta Components/ Control Specifications Manager/ New y se definen los parámetros. La fecha resulta indiferente para el cálculo.

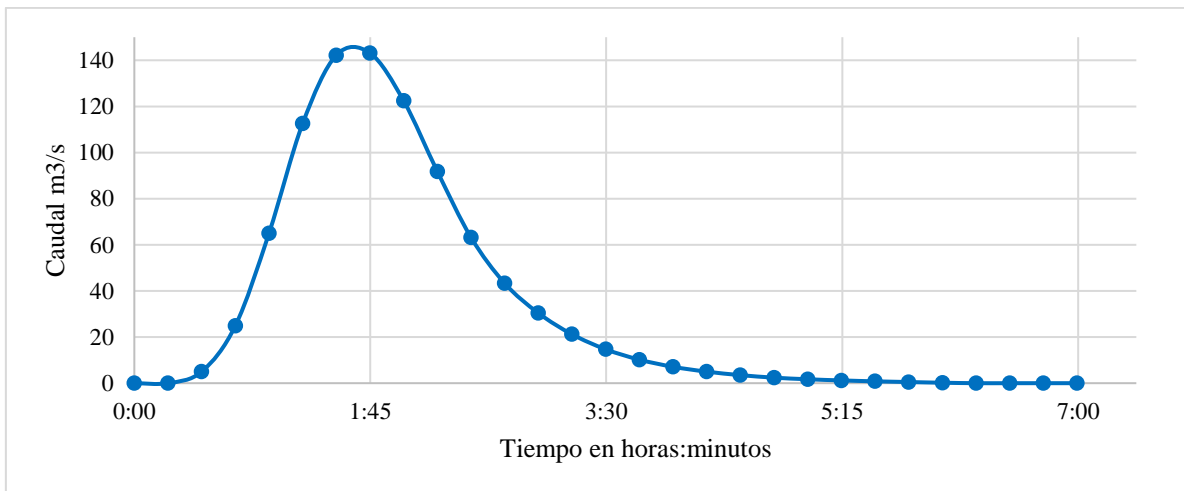
Ilustración 43. Especificaciones de control HEC-HMS



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

Para computar los resultados se sigue la ruta Compute/Create Compute/Simulation Run y se eligen los parámetros creados para la simulación, se debe tomar en cuenta los modelos meteorológicos para cada tiempo de retorno. Una vez realizada la simulación se procede a observar los resultados, el programa arroja una serie de tablas y gráficos que se procesan de mejor manera en Excel, obteniéndose así los siguientes gráficos.

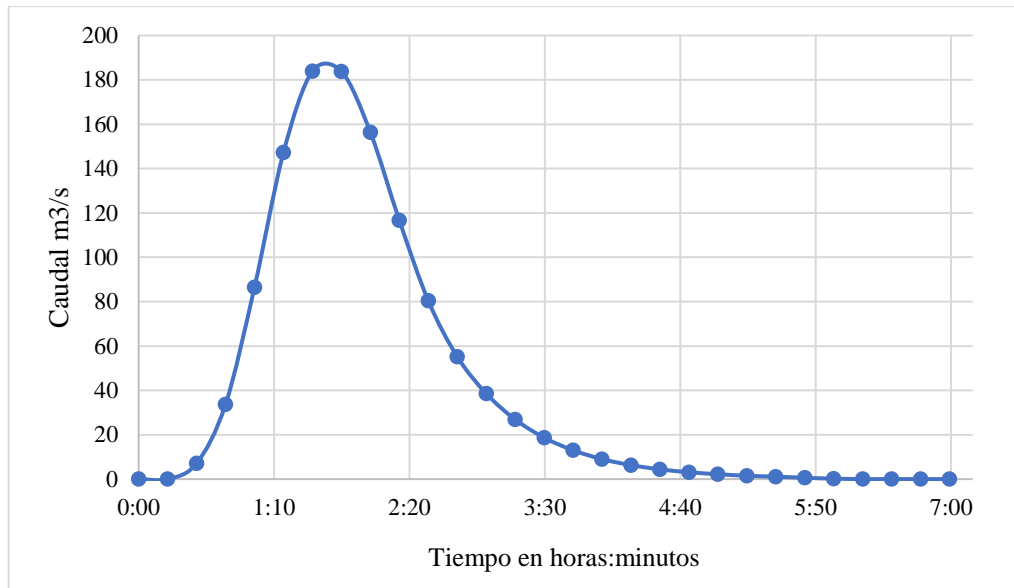
Gráfico 11. Hidrograma de crecidas-TR 50 años- Río Cubi



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

El caudal pico de crecida para un tiempo de retorno de 50 años obtenido de HEC-HMS es de 143 m³/s, lo que se corresponde con el método HUSCS y el método del hidrograma triangular del estudio hidrológico realizado por M. Zarria, 2018 ya que se obtiene un error relativo de 2,21% respecto al último método.

Gráfico 12. Hidrograma de crecidas-TR 100 años- Río Cubi

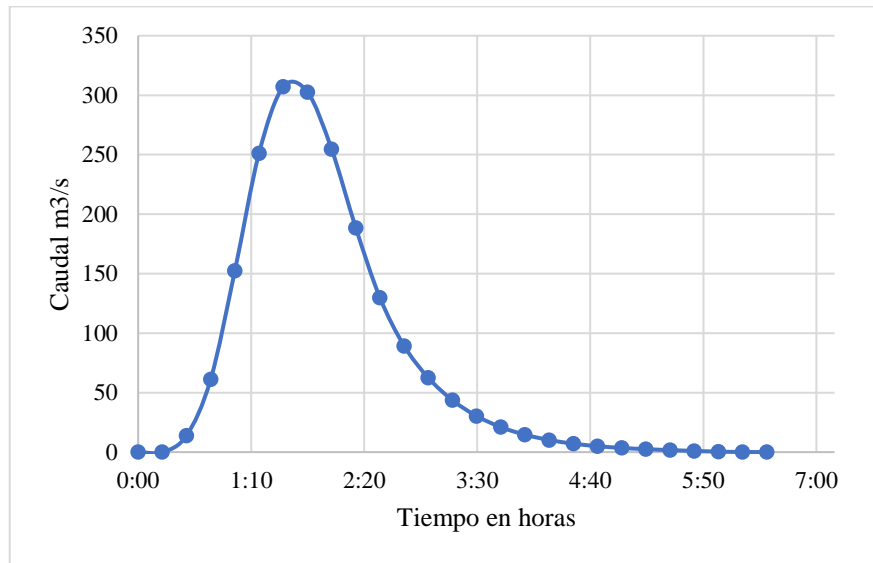


Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

EL caudal pico de crecida para un tiempo de retorno de 100 años conseguido de HEC-HMS es de 183 m³/s, lo que es un valor un poco más elevado de lo obtenido con el método HUSCS y el método del hidrograma triangular del estudio hidrológico realizado por M. Zarria, 2018, se obtiene un error del 10, 11%. Esto se debe en medida a que, en el estudio de M. Zarria, se emplea un solo valor de CN para toda la cuenca, en cambio en el modelo HEC-HMS se emplea los valores de CN obtenidos para cada tipo y uso de suelo, por lo que es una aproximación más acertada.

Además, se calculó el caudal pico para un periodo de retorno de 500 años, obteniendo un caudal pico de 301,7 m³/s, como se muestra en el siguiente gráfico.

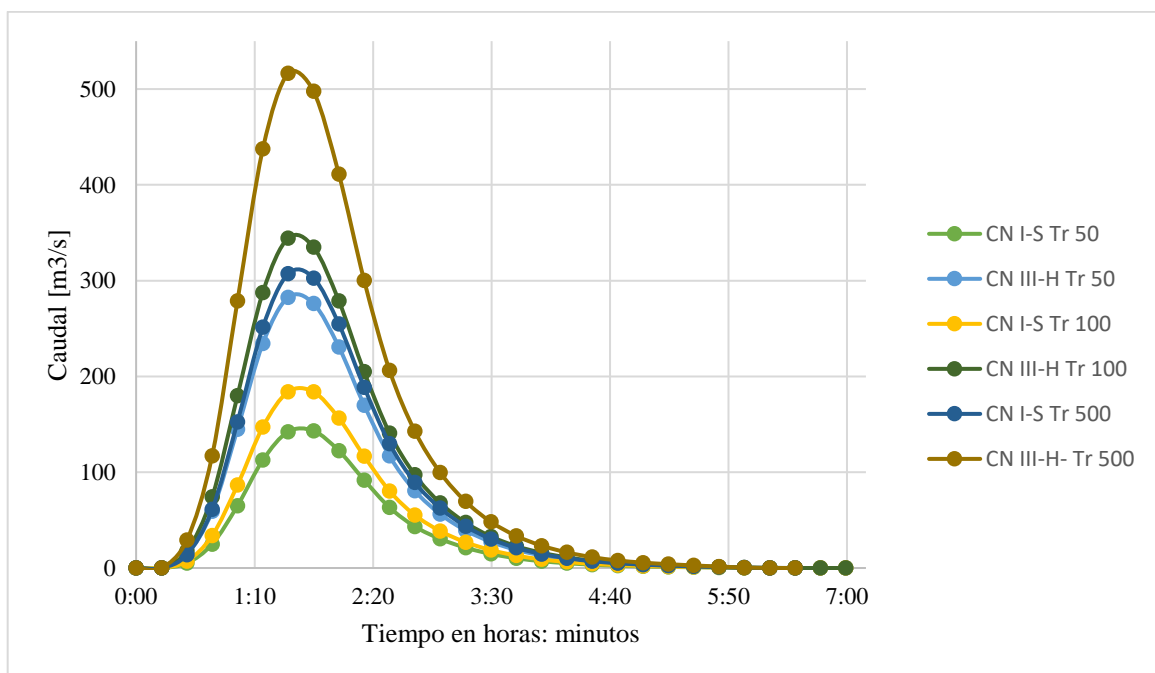
Gráfico 13. Hidrograma de crecidas-TR 500 años- Río Cubi



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

En el modelo de HEC- HMS se trabajó con distintos periodos de retorno y condiciones del suelo, modificando el número de curva CN, alternando la condición seca y la condición húmeda. El siguiente gráfico permite diferenciar las distintas condiciones modeladas en HEC-HMS.

Gráfico 14. Hidrogramas de crecidas río Cubi

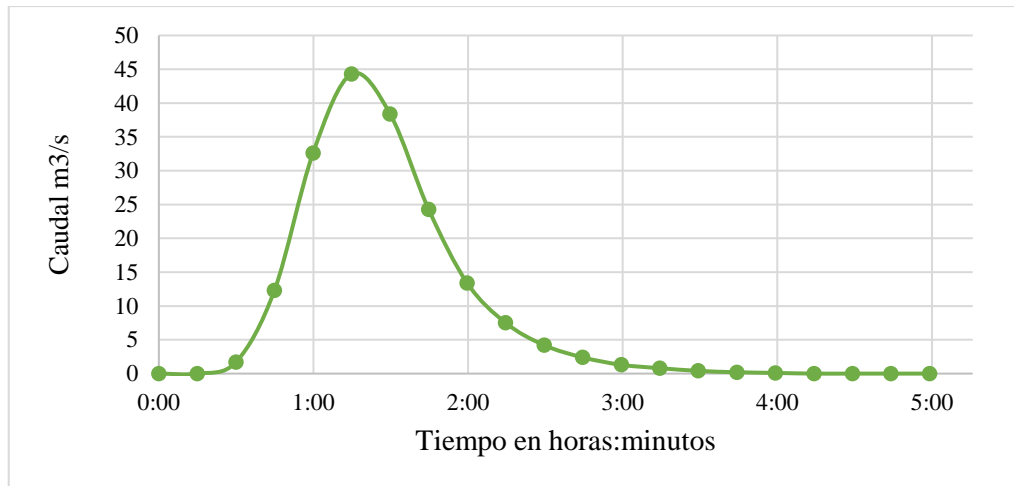


Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

Una vez calibrado el modelo en HEC-HMS con los registros de precipitaciones para diferentes tiempos de retorno, el modelo meteorológico y las especificaciones de control se procede a calcular los caudales de crecida para la cuenca del río Perlabi, mismos que no estaban contemplados en el estudio de M. Zarria, 2018. Se obtienen los siguientes resultados.

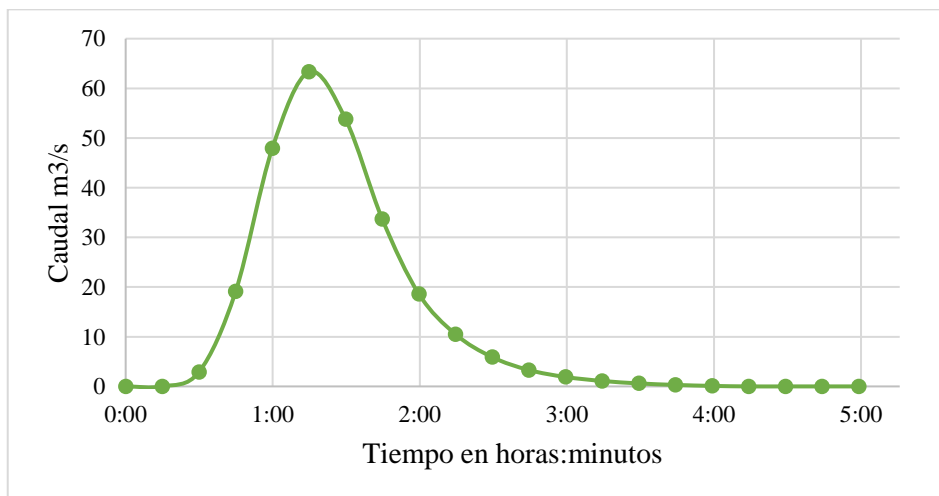
El caudal pico del río Perlabi para un periodo de retorno de 50 años obtenido de HEC-HMS es de 44,3 m³/s y para un periodo de retorno de 100 años es de 63,3 m³/s, como se indica en los siguientes hidrogramas.

Gráfico 15. Hidrograma de crecidas-TR 50 años- Río Perlabi



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

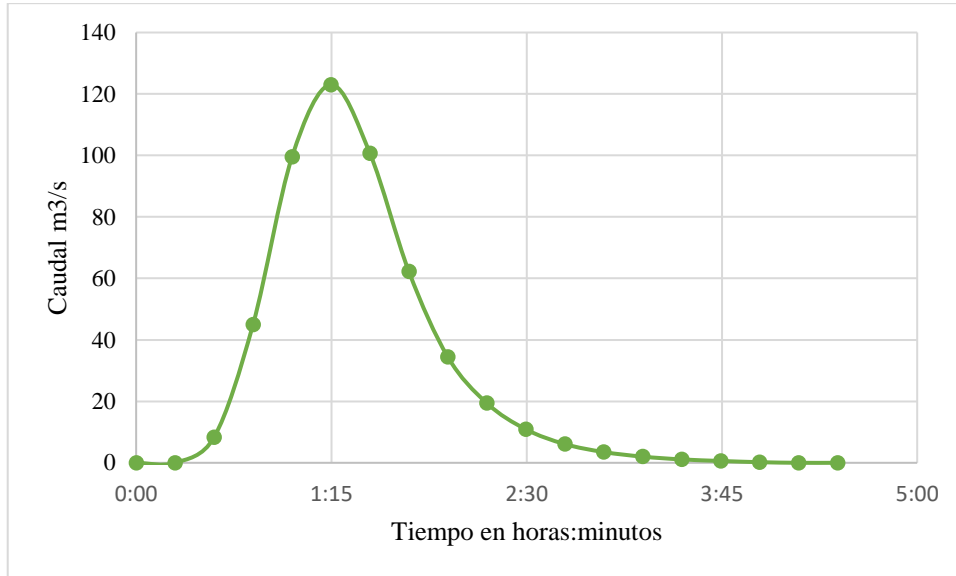
Gráfico 16. Hidrograma de crecidas-TR 100 años- Río Perlabi



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

El caudal pico del río Perlabi para un periodo de retorno de 500 años obtenido de HEC-HMS es de 123 m³/s, como indica el siguiente hidrograma.

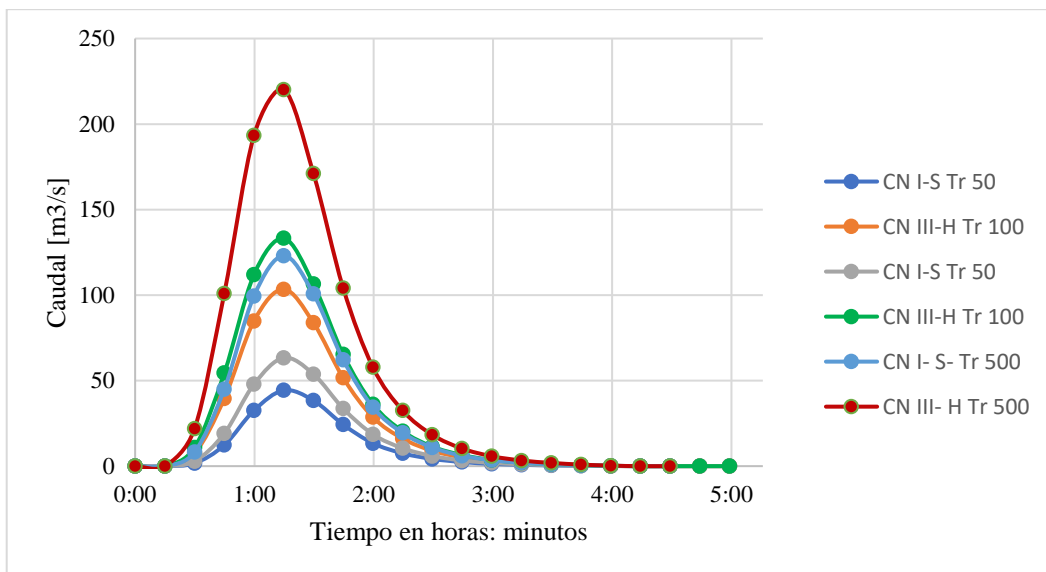
Gráfico 17. Hidrograma de crecidas-TR 500 años- Río Perlabi



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

De igual manera en el modelo de HEC- HMS para la cuenca del río Perlabi se trabajó con distintos periodos de retorno y condiciones del suelo, modificando el número de curva CN, siguiente gráfico permite diferenciar las distintas condiciones modeladas en HEC-HMS.

Gráfico 18. Hidrogramas de crecidas río Perlabi



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

En resumen, se obtienen los siguientes caudales picos en m³/s para las ríos Cubi y Perlabi para diferentes periodos de retorno.

Tabla 31. Resumen caudales de crecida en m³/s obtenidos de HEC-HMS

	TR: 50 años	TR: 100 años	TR: 500 años
Río Cubi	143.10	183.90	307.10
Río Perlabi	44.30	63.30	123

Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

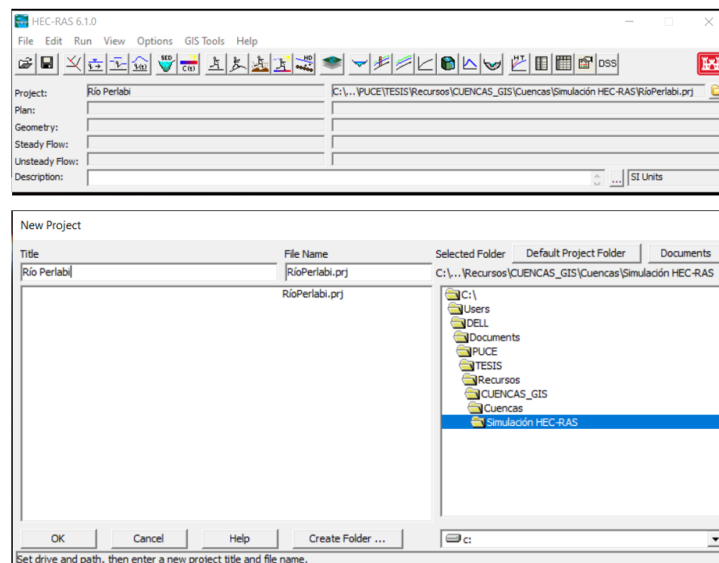
4.2.3 Ingreso de datos hidráulicos

En el software HEC-RAS se deberá ingresar las características del área de estudio para esto se debe seguir los siguientes pasos principales:

- Iniciar un nuevo proyecto y guardarlo
- Ingresar los datos geométricos
- Ingresar los datos de flujo y las condiciones de borde

Al iniciar un nuevo proyecto se le asigna un nombre y una carpeta de destino en donde se guardarán todos los archivos asociados al proyecto.

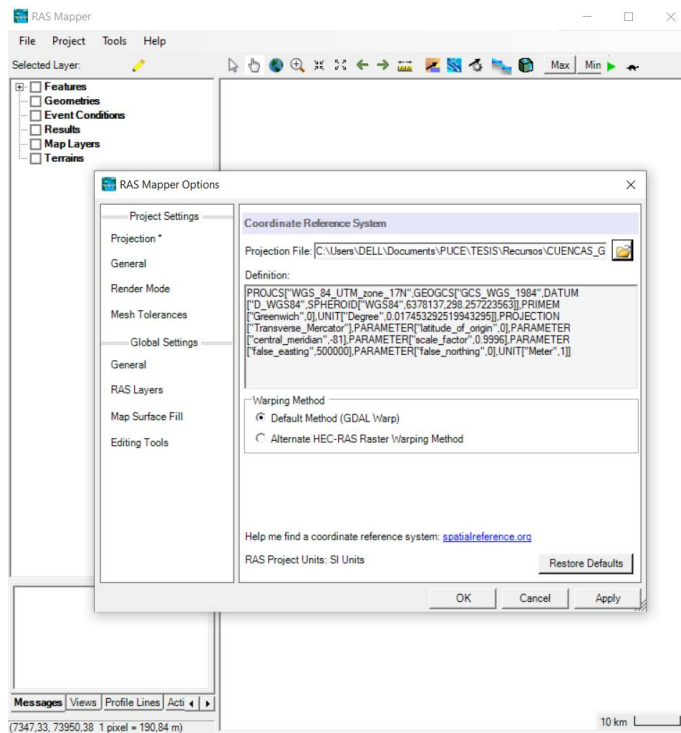
Ilustración 44. Crear nuevo proyecto en HEC-RAS



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

Para ingresar los datos geométricos se utiliza la herramienta RAS Mapper, en donde en primer lugar se fija el sistema de proyección mediante la ruta Project/Set Projection y se elige el archivo (.prj) correspondiente que contiene el sistema de referencia del proyecto.

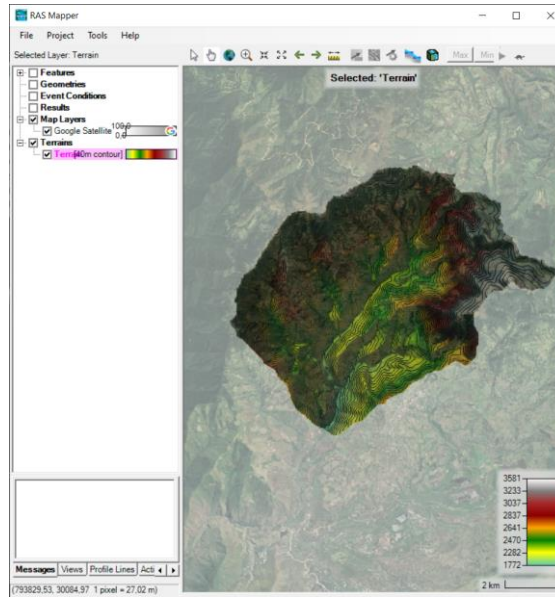
Ilustración 45. Herramienta RAS Mapper



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

Para importar el modelo digital de elevación (DEM) se da clic derecho en Terrain/Create a New Ras Terrain y se selecciona el archivo (.tif) de la cuenca correspondiente, adicionalmente se puede añadir una capa base de un mapa georreferenciado para una mejor visualización. Luego se debe definir la geometría a estudiar delimitando un perímetro y un área de estudio, de igual manera se establecen las líneas de condiciones de borde, es decir, el límite de aguas arriba y de aguas abajo para la delimitación de la llanura de inundación. También se establece el coeficiente de Manning obtenido por el método de Cowan, $n=0.412$. Esto se realiza en la pestaña de Geometries/Add New Geometry/2D Flow Areas y se delimitan los parámetros necesarios.

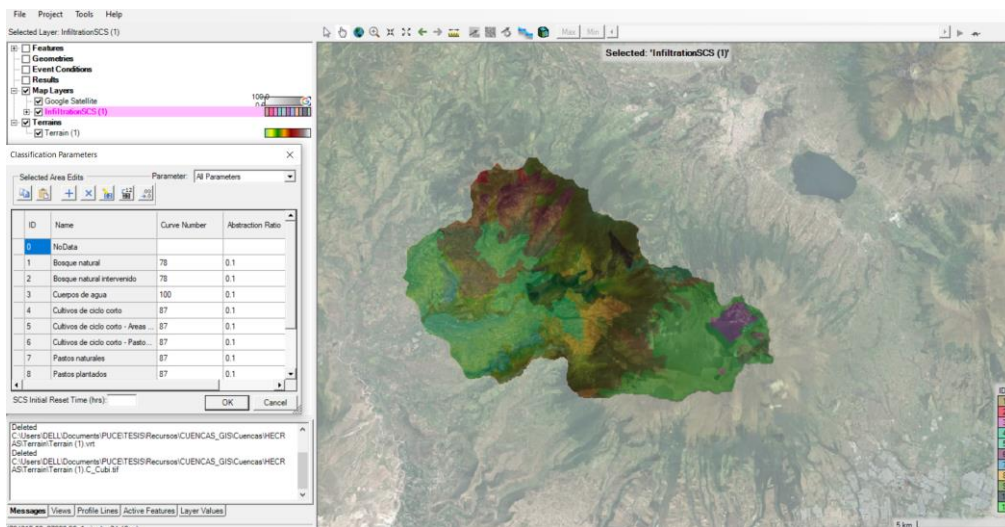
Ilustración 46. Modelo DEM en HEC-RAS



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

También es factible ingresar una capa correspondiente a los números de Curva (CN) para representar en el modelo el uso de suelo y la escorrentía potencial, esta capa se obtiene del modelo realizado en ArcGIS. Debe ingresarse el valor de “Abstraction ratio” que según sugiere el manual de HEC-RAS está en el rango de 0.05 y 0.2; por lo que se opta por un valor de 0.1 para las cuencas en estudio y se visualiza de la siguiente manera.

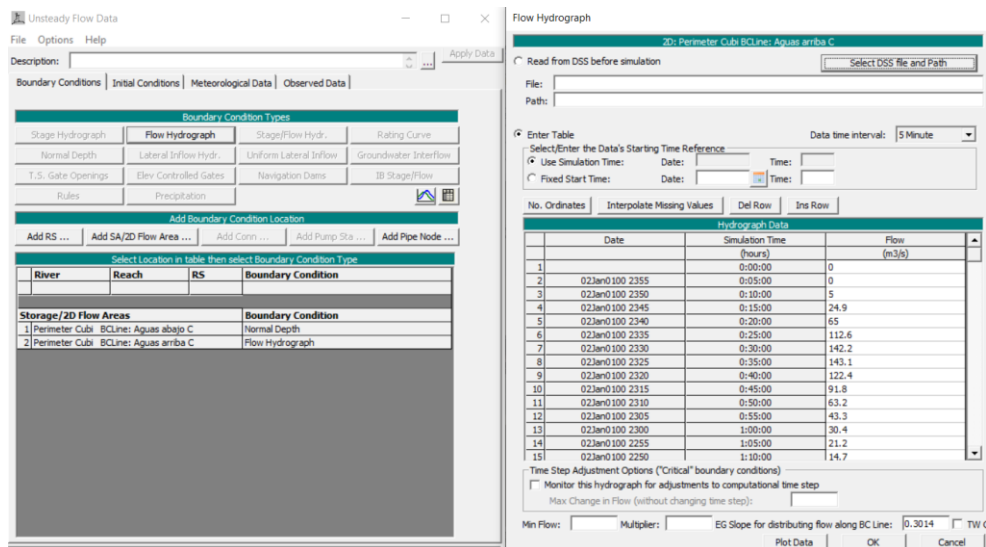
Ilustración 47. Ingreso de Curva Número en HEC-RAS



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

Estas condiciones deben asignarse al proyecto mediante la pestaña “View/Edit Geometric Data” de la ventana principal de HEC-RAS en donde se deberá cargar la geometría creada. Adicionalmente se debe ingresar las condiciones de borde que rigen las características del flujo en estudio. Para crear las condiciones aguas arriba (flujo supercrítico) y aguas abajo (flujo subcrítico), se debe usar la pestaña “View/Edit Unsteady Flow Data” ya que se realizará una simulación de flujo no permanente para representar de mejor manera la información disponible de los hidrogramas, además se requiere un análisis completo del flujo, es decir, tanto subcrítico como supercrítico.

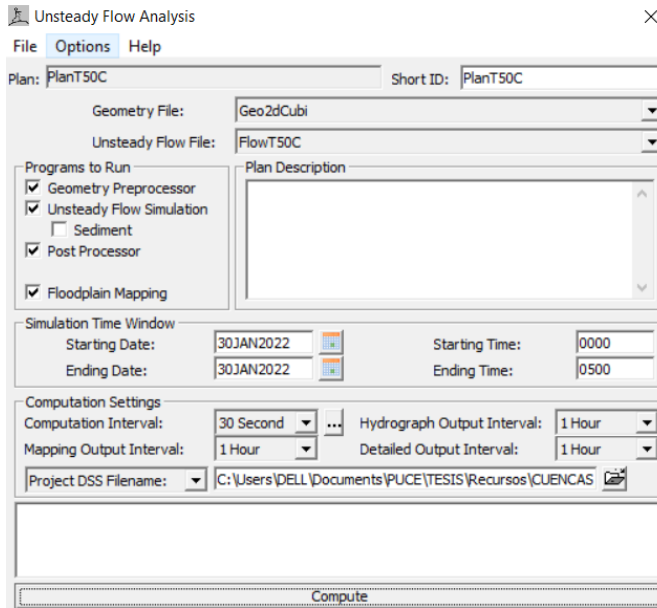
Ilustración 48. Condiciones de flujo no permanente en HEC-RAS



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

La simulación se realiza creando un plan en la pestaña “Perform an unsteady Flow simulation” de la ventana principal. En esta ventana se establecen las fechas, mismas que deben coincidir con las del hidrograma ingresado. Se define un intervalo de cómputo y se procede con la simulación. Es recomendable realizar el cómputo con un intervalo de 1 segundo para resultados más acertados, si bien el procesamiento tarda más tiempo es mejor realizarlo de esta manera.

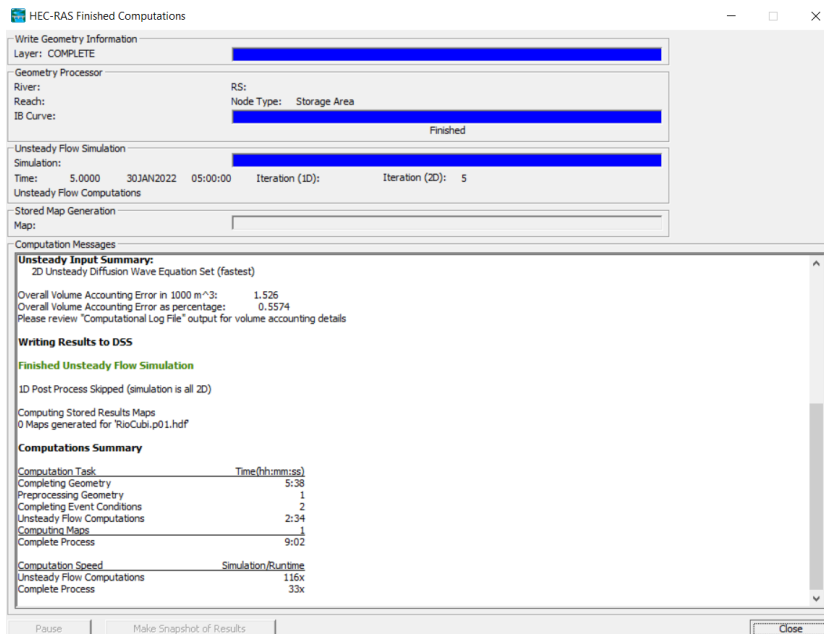
Ilustración 49. Análisis de flujo no permanente



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

Una vez completada la simulación aparecerá una ventana como la siguiente que indica que la simulación ha sido satisfactoria y se procede a observar los resultados en la ventana de Ras Mapper.

Ilustración 50. Simulación finalizada HEC-RAS



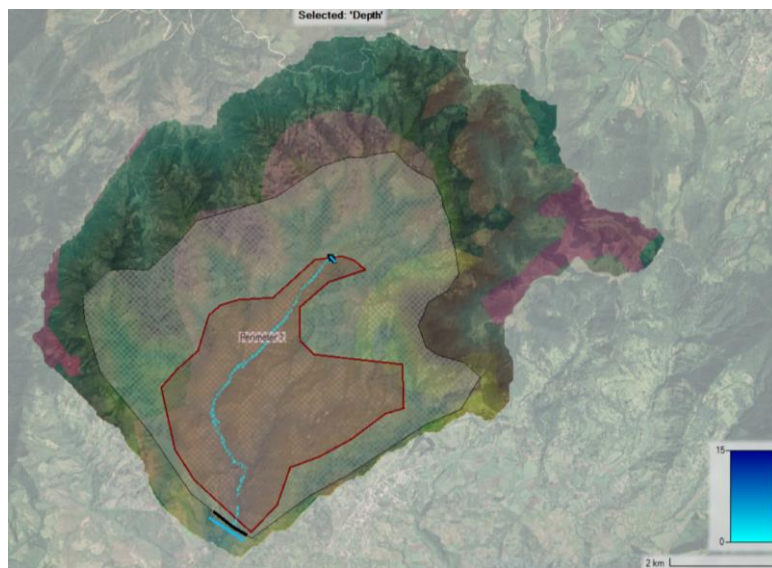
Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

4.2.4 Resultados HEC-RAS

4.2.4.1 Visualización de resultados

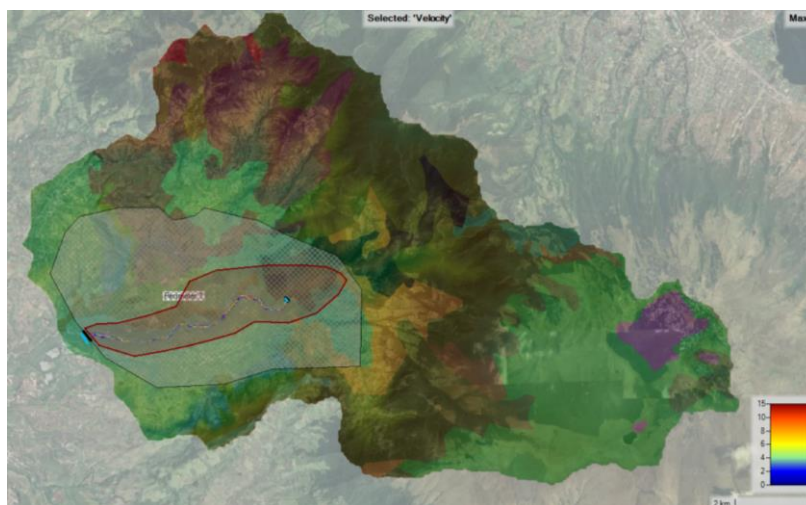
Una vez ingresada toda la información necesaria a HEC-RAS y haber realizado la simulación se visualizan los resultados en la ventana de Ras Mapper, aquí se puede observar los tirantes generados, así como las velocidades en el cauce del río. Las siguientes ilustraciones muestran las cuencas en estudio con todos los parámetros ingresados en HEC-RAS.

Ilustración 51. Cuenca del río Perlabi en HEC-RAS



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

Ilustración 52. Cuenca del río Cubi en HEC-RAS



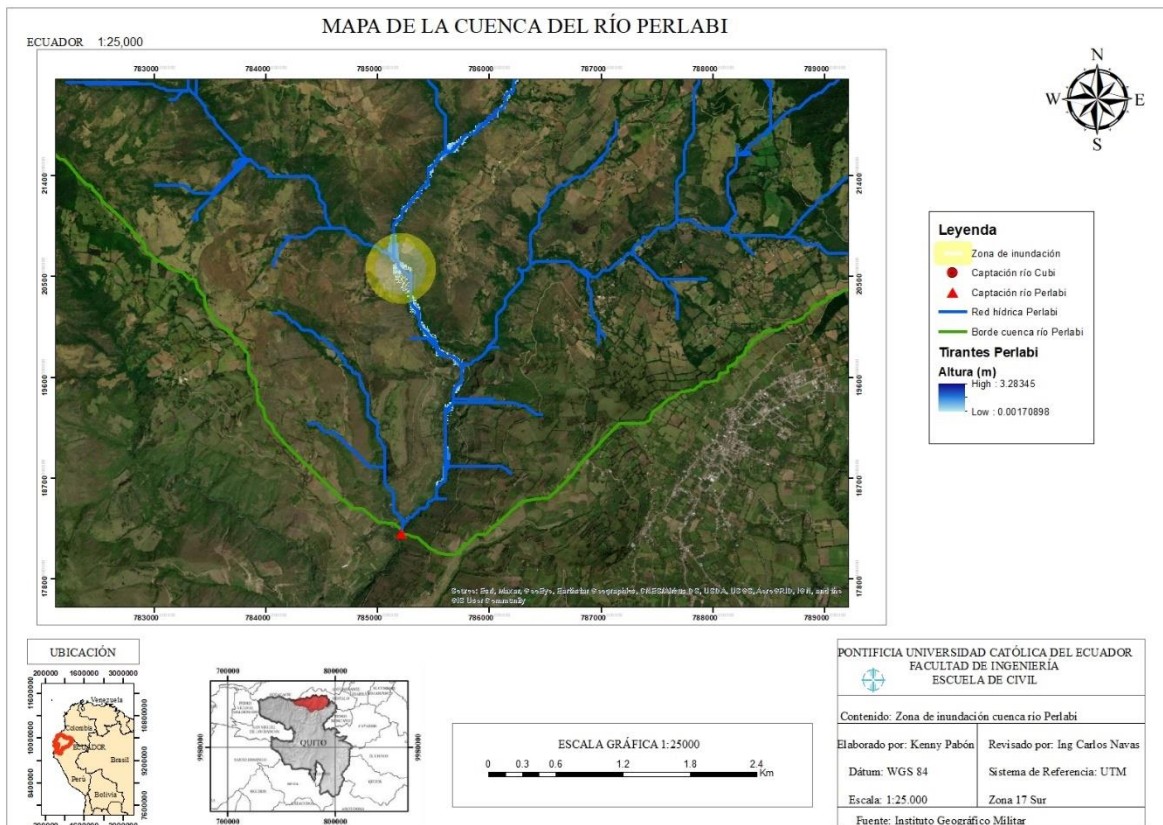
Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

Para acceder a los valores numéricos de los resultados se debe crear un línea de perfil que delimitará la zona a analizarse y luego se procesan en Excel para una mejor interpretación. Para este caso es pertinente realizar una inspección visual de las zonas que presentes tirantes bajos y que además se note que el agua ha perdido su curso, generando así zonas de inundación. Además, es importante analizar las velocidades altas que se han generado en ambos ríos.

4.2.4.2 Análisis y discusión de resultados

Los resultados pueden visualizarse en ArcGIS e identificar las zonas de inundación, luego se analiza el volumen acumulado, la velocidad y el flujo en esta zona.

Ilustración 53. Zona de inundación río Perlabi

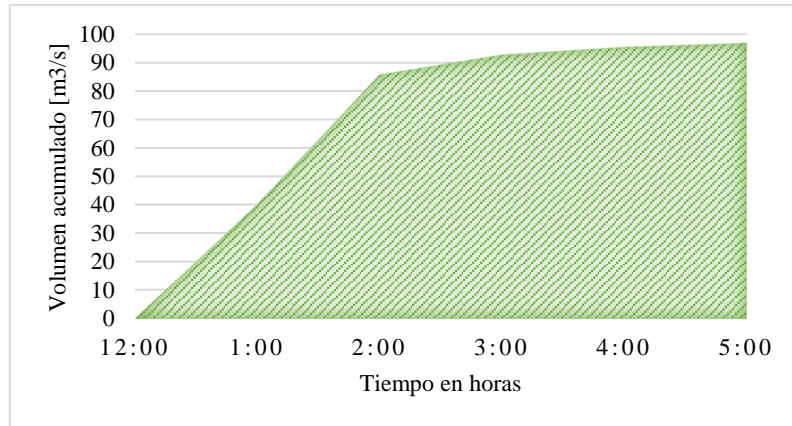


Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

En el mapa puede observarse una zona de inundación por los caudales generados para un tiempo de retorno de 100 años, esta zona se encuentra a aproximadamente 3 Km del punto de captación del río Perlabi por lo que la ubicación de un punto de control cerca de esta zona

sería propicia. Del modelo de HEC-RAS se obtuvo que el volumen acumulado luego de ocurrido el evento de crecida en este lugar es de $96.78 \text{ m}^3/\text{s}$ por lo que la inundación es factible, como se muestra en el siguiente gráfico.

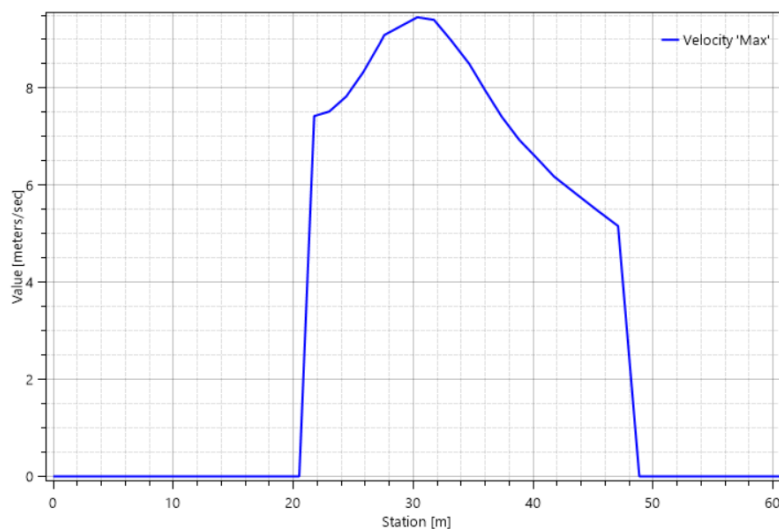
Ilustración 54. Volumen acumulado zona de inundación río Perlabi



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

La velocidad del flujo antes de producirse la inundación es de $9.46 \text{ m}^3/\text{s}$ lo que corresponde a una velocidad elevada, indicando que el caudal correspondiente es alto, siendo este de $34.84 \text{ m}^3/\text{s}$.

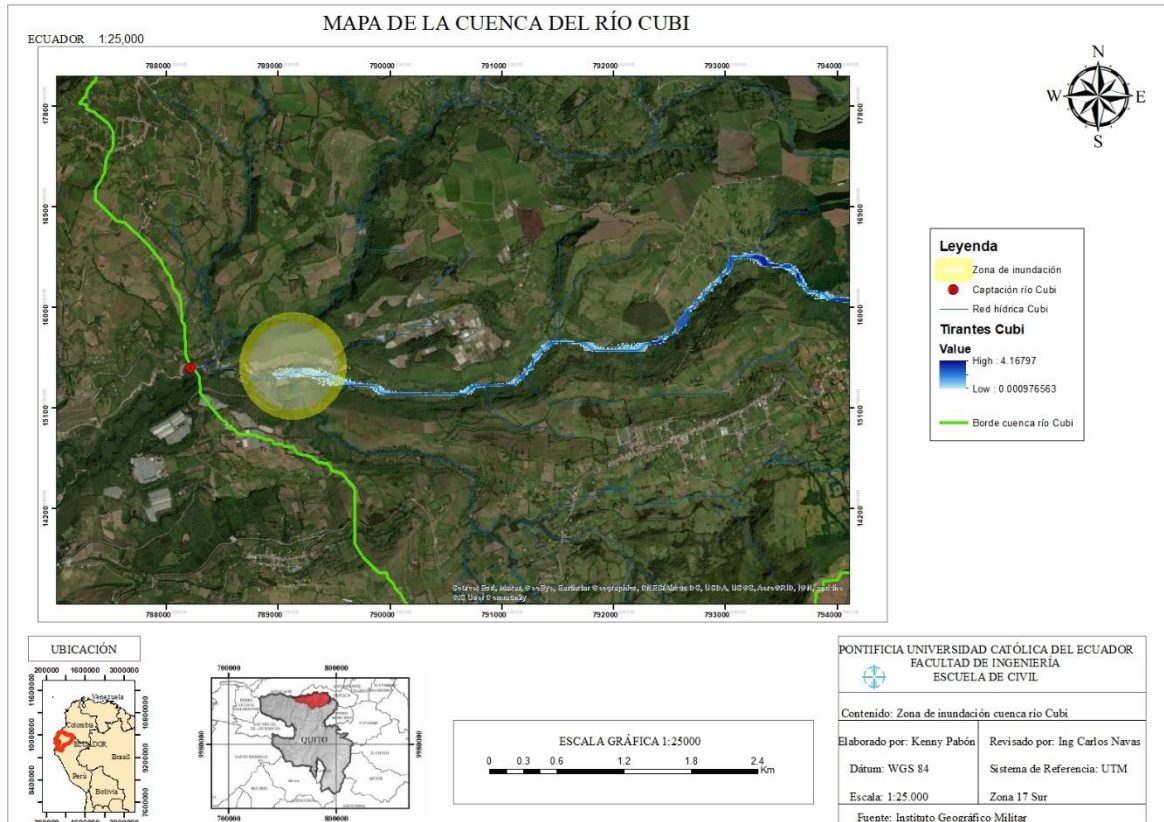
Ilustración 55. Velocidad máxima zona de inundación río Perlabi



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

De igual manera para la cuenca del río Cubi se siguió el mismo procedimiento y se obtuvieron los siguientes resultados. Observándose la siguiente zona de inundación en esta cuenca hidrográfica.

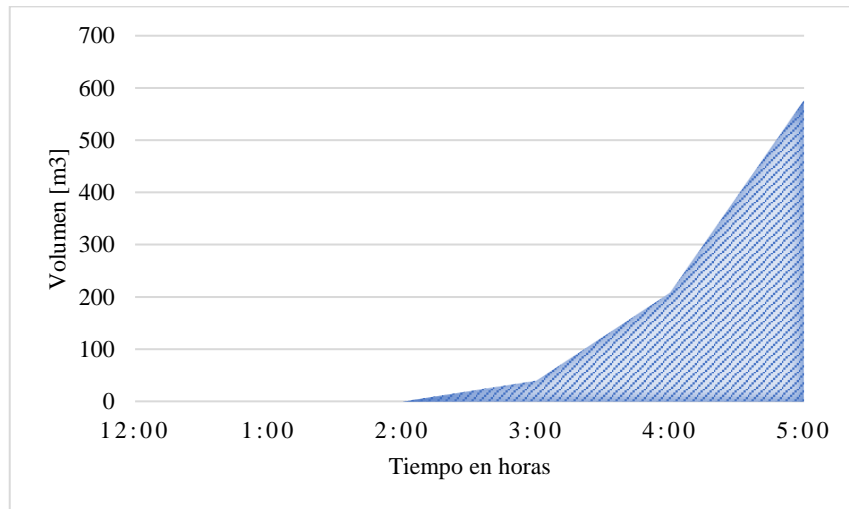
Ilustración 56. Zona de inundación río Cubi



Fuente: Elaboración propia, ArcGIS

En el mapa se visualiza una zona de inundación por los caudales obtenidos para un tiempo de retorno de 100 años, esta zona se encuentra a aproximadamente 1.8 Km del punto de captación del río Perlabi por lo que la ubicación de un punto de control cerca de esta zona sería propicia. Del modelo de HEC-RAS se consiguió que el volumen acumulado después de presentarse el evento de crecida en este lugar es de $575\text{m}^3/\text{s}$ por lo que la inundación es inminente, como indica en el siguiente gráfico.

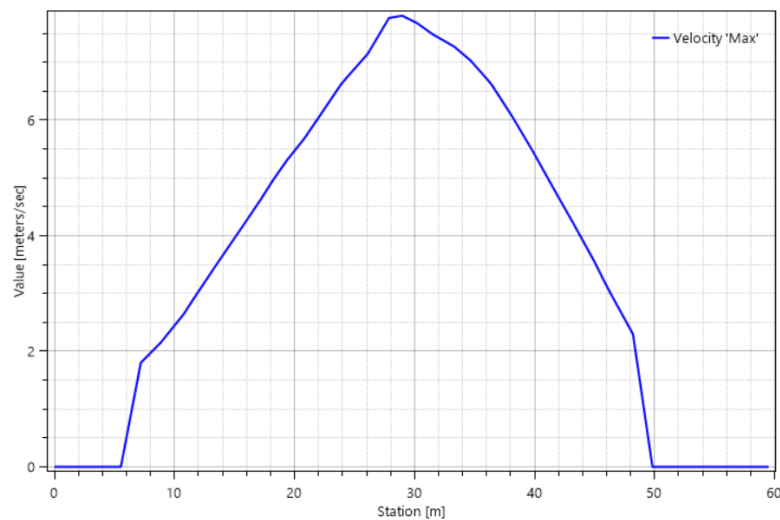
Ilustración 57. Volumen acumulado zona de inundación cuenca río Cubi



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

La velocidad del flujo previo a suscitarse la inundación es de $7.81 \text{ m}^3/\text{s}$ lo que significa una velocidad alta, indicando que el caudal correspondiente es alto, siendo este de $133 \text{ m}^3/\text{s}$ por lo que se produce la inundación.

Ilustración 58. Velocidad máxima zona de inundación río Cubi

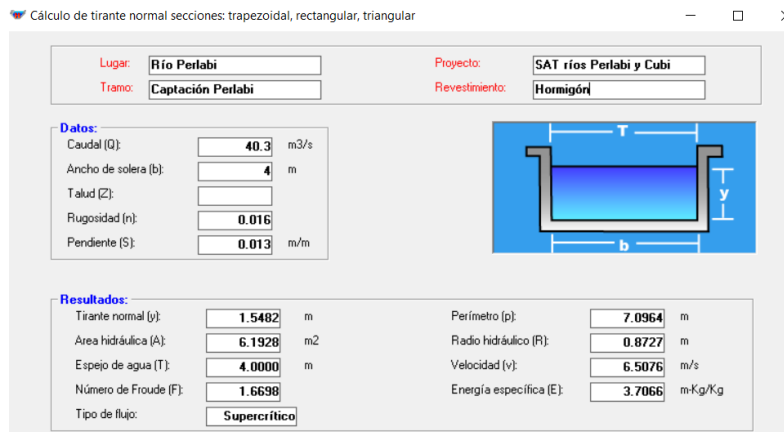


Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

4.2.4.3 Simulación de sección tipo en función del caudal

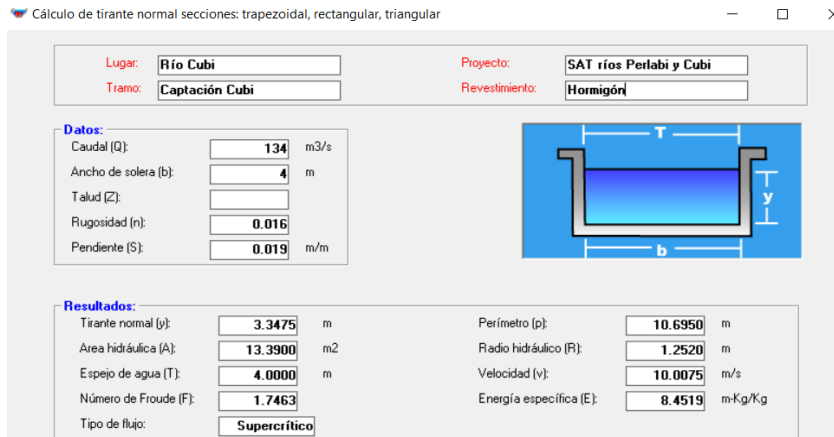
La sección tipo a considerarse viene en función de los caudales máximos obtenidos, así como las velocidades de los cauces de los ríos. Para un predimensionamiento de la estructura hidráulica se emplea el programa HCanales, en donde se ingresa el ancho de la solera, el caudal, la pendiente y la rugosidad, para obtener así el tirante normal y demás características del canal. La sección preliminar tendrá una dimensión de 4m de ancho de solera, una rugosidad de 0.016 para canales revestidos de concreto de condición regular y una pendiente de 0.013 para el río Perlabi y de 0.019 m/m para el río Cubi. Se muestran los resultados para los caudales de un periodo de retorno de 50 años de los ríos Perlabi y Cubi.

Ilustración 59. Canal río Perlabi



Fuente: Elaboración propia, HCanales

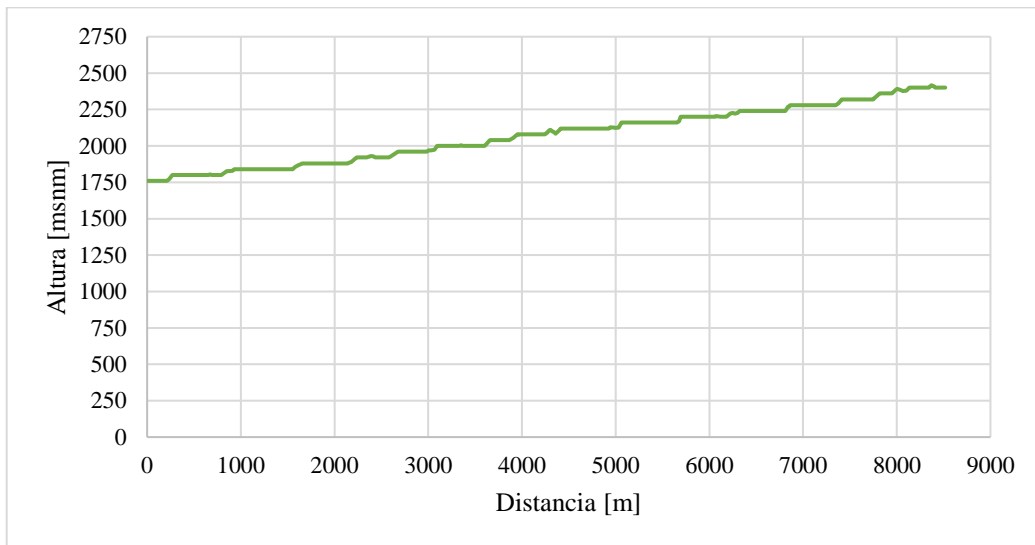
Ilustración 60. Canal río Cubi



Fuente: Elaboración propia, HCanales

Para la formulación de los modelos de los canales se toma en cuenta los perfiles topográficos de los cursos principales de los ríos Perlabi y Cubi elaborados a partir de la información del modelo realizado en ArcGIS. El canal se ubica cerca de una residencia y el modelo se simula en función de la topografía de esta zona. La simulación corresponde a un flujo permanente y flujo supercrítico.

Ilustración 61. Perfil topográfico río Perlabi



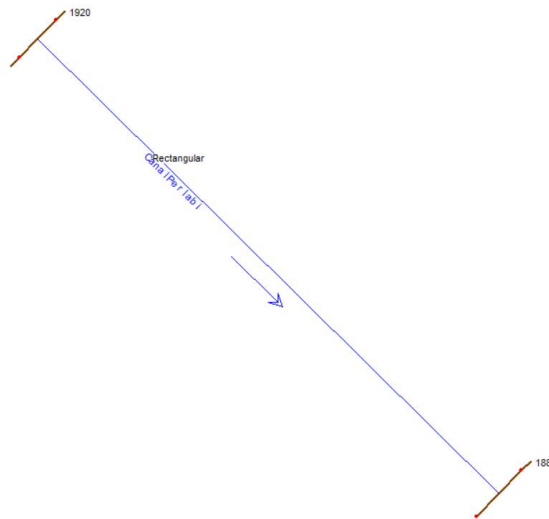
Fuente: Elaboración propia, ArcGIS

Para el río Perlabi se considera la información del perfil topográfico desde los 4 Km hasta los 4.1 Km y se realiza la simulación del canal rectangular propuesto de longitud de 25 m en HEC-RAS iniciándose en las coordenadas:

- Latitud: 0°56'40" N
- Longitud: 78°25'48" W

Se construye la sección obtenida de HCanales ingresando la información de la geometría en HEC-RAS, desde la ventana principal, en la pestaña View/Edit geometric data y luego "Cross Section", aquí se especifica la sección aguas arriba y aguas abajo en donde se visualiza el canal a analizarse.

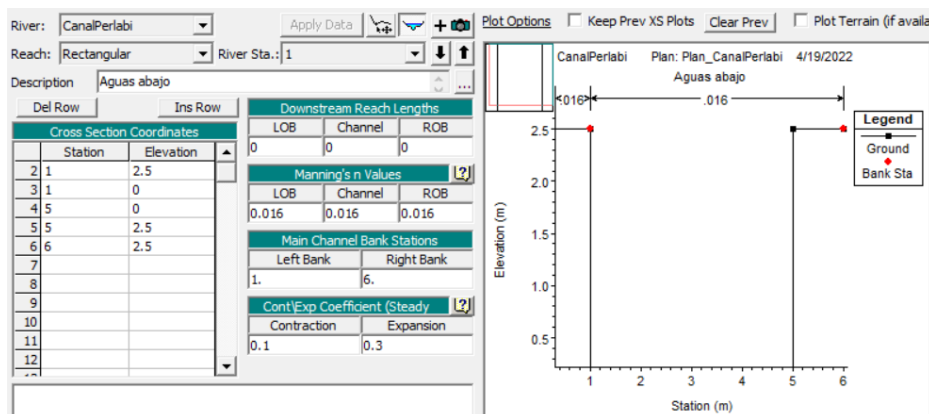
Ilustración 62. Esquema del canal del río Perlabi



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

La sección se construyó luego de varias iteraciones y se consiguió un canal de ancho de solera de 4 m con una altura medida desde el fondo de 2.5m.

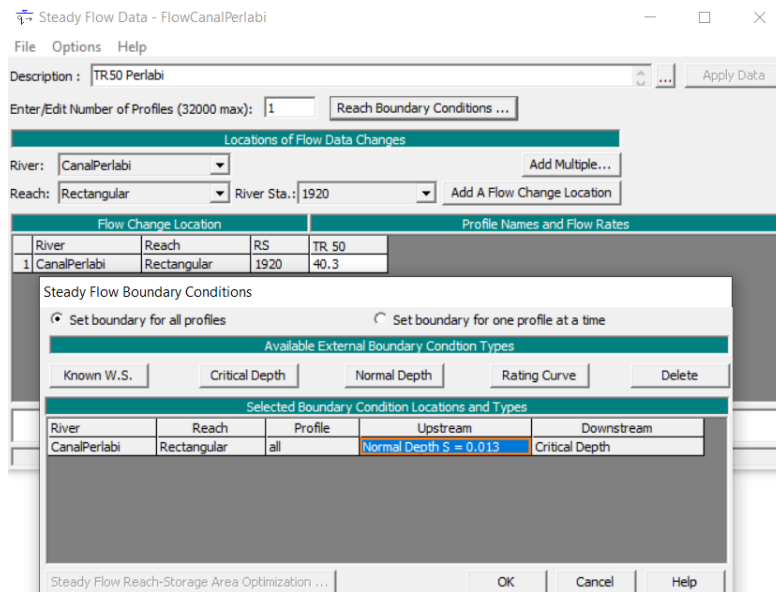
Ilustración 63. Sección del canal río Perlabi



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

Los datos de flujo permanente son requeridos para realizar un cálculo del perfil de la superficie del agua. Los datos de flujo constante consisten en: régimen de flujo, condiciones de borde, y caudal. Para flujo supercrítico las condiciones de borde se emplean solo aguas arriba del sistema. Se ingresa el caudal a analizarse de 44.30 m³/s y la pendiente que corresponde al tramo.

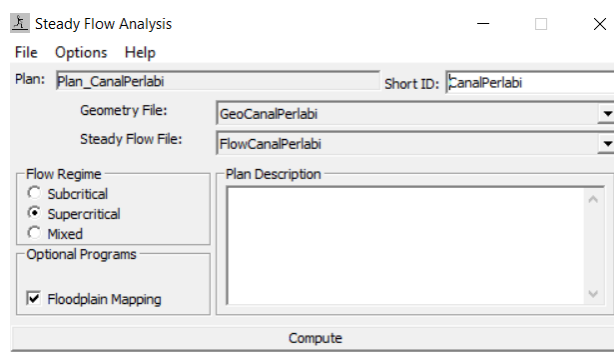
Ilustración 64. Datos de flujo permanente



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

Una vez establecidas estas condiciones se procede a computar el modelo para un régimen supercrítico en la pestaña Run/ Steady Flow Analysis de la ventana principal de HEC-RAS.

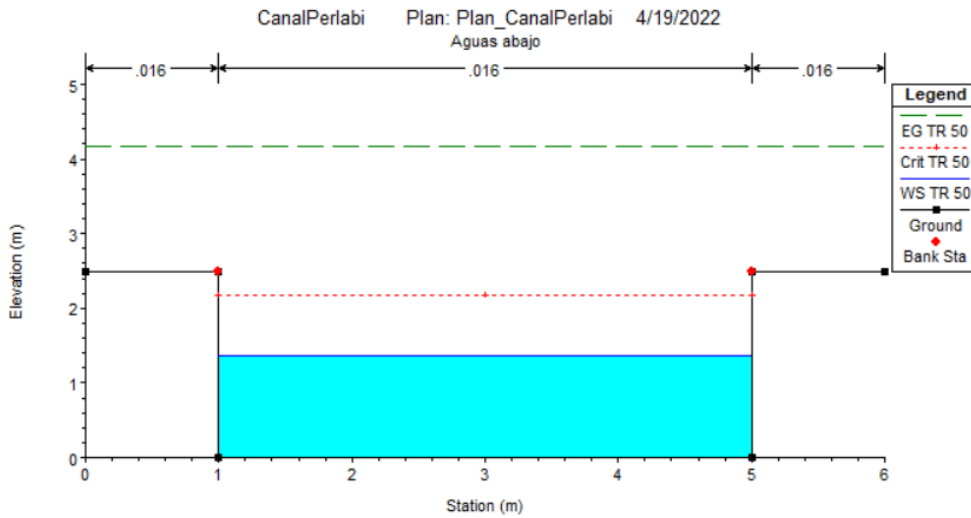
Ilustración 65. Análisis de flujo permanente HEC-RAS



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

Luego de haber computado el modelo se procede a visualizar los resultados, pudiéndose observar la superficie libre de agua y el tirante crítico del canal. La altura del tirante crítico para el caudal analizado es de 2.17 m, y la altura del tirante normal de 1.55 m por lo que la altura de 2.5 m es adecuada para el diseño.

Ilustración 66. Resultados HEC-RAS canal río Perlabi



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

También se obtienen una tabla resumen con los resultados relevantes para el análisis del canal. Aquí se puede visualizar la velocidad, el tirante normal, el área hidráulica, el perímetro mojado, valores que se corresponden con el análisis realizado con HCanales, por lo que se acepta los resultados.

Ilustración 67. Resumen resultados canal río Perlabi en HEC-RAS

Plan: CanalPerlabi CanalPerlabi Rectangular RS: 1920 Profile: TR 50					
Element	Value	Left OB	Channel	Right OB	
E.G. Elev (m)	5.01				
Vel Head (m)	2.16		0.016		
W.S. Elev (m)	2.85	25.00	25.00	25.00	
Crit W.S. (m)	3.47		6.19		
E.G. Slope (m/m)	0.013022		6.19		
Q Total (m3/s)	40.30		40.30		
Top Width (m)	4.00		4.00		
Vel Total (m/s)	6.51		6.51		
Max Chl Dpth (m)	1.55		1.55		
Conv. Total (m3/s)	353.2		353.2		
Length Wtd. (m)	25.00		7.09		
Min Ch El (m)	1.30		111.40		
Alpha	1.00		725.42		
Frctn Loss (m)	0.42		0.14		
C & E Loss (m)	0.11		0.10		

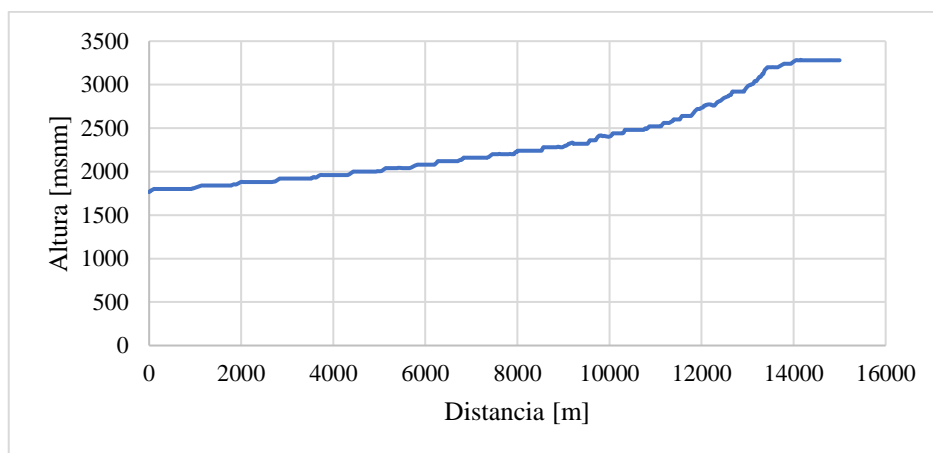
Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

Para el diseño del Sistema de Alerta Temprana es relevante el dato de la velocidad de flujo en el canal de 6.51 m/s y la altura del tirante normal de 1.55m. Cuando el nivel del agua en el canal sobrepase esta altura se activará la alarma y tomando en cuenta la distancia de 4.5 Km desde la ubicación del canal hasta el punto de captación del río Perlabi, se puede decir que ante un evento de crecida se contará con aproximadamente 11 minutos como tiempo de alerta y reacción ante el evento.

Siguiendo el mismo procedimiento se diseña el canal para el río Cubi. Para el río Cubi se considera la información del perfil topográfico mostrado a continuación desde los 2 Km hasta los 2.1 Km y se realiza la simulación del canal rectangular propuesto de longitud de 25 m en HEC-RAS iniciándose en las coordenadas:

- Latitud: 0°08 ' 16.80" N
- Longitud: 78° 23' 34.80" W

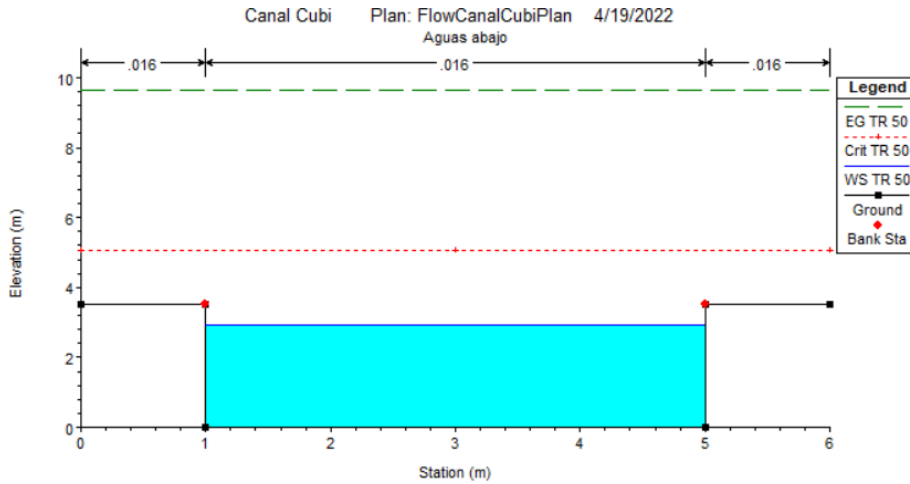
Ilustración 68. Perfil topográfico río Cubi



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

Los resultados obtenidos de esta simulación indican que la altura del tirante crítico para el caudal analizado es de 5.04 m, y la altura del tirante normal de 3.35 m por lo que la altura de diseño del canal será de 3.50 m.

Ilustración 69. Resultados HEC-RAS canal río Cubi



Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

Para el diseño del Sistema de Alerta Temprana es importante el dato de la velocidad de flujo en el canal de 10.01 m/s y la altura del tirante normal de 3.35 m. Cuando el nivel del agua en el canal exceda esta altura se activará la alarma y considerando la distancia de 2 Km desde la ubicación del canal hasta el punto de captación del río Cubi, se puede inferir que ante un evento de crecida se tendrá aproximadamente 3 minutos para tiempo de alerta y reacción ante el acontecimiento.

Ilustración 70. Resumen resultados canal río Cubi en HEC-RAS

Plan: FlowCubi Canal Cubi Rectangular RS: 1880 Profile: TR 50					
Element		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	10.36	Wt. n-Val.		0.016	
Vel Head (m)	5.11	Reach Len. (m)	25.00	25.00	25.00
W.S. Elev (m)	5.25	Flow Area (m2)		13.38	
Crit W.S. (m)	6.95	Area (m2)		13.38	
E.G. Slope (m/m)	0.019025	Flow (m3/s)		134.00	
Q Total (m3/s)	134.00	Top Width (m)		4.00	
Top Width (m)	4.00	Avg. Vel. (m/s)		10.01	
Vel Total (m/s)	10.01	Hydr. Depth (m)		3.35	
Max Chl Dpth (m)	3.35	Conv. (m3/s)		971.5	
Conv. Total (m3/s)	971.5	Wetted Per. (m)		10.69	
Length Wtd. (m)	25.00	Shear (N/m2)		233.53	
Min Ch El (m)	1.90	Stream Power (N/m s)		2338.25	
Alpha	1.00	Cum Volume (1000 m3)		0.31	
Frctn Loss (m)	0.56	Cum SA (1000 m2)		0.10	
C & E Loss (m)	0.16				

Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

4.2.5 Sistema de Alerta Temprano propuesto

4.2.5.1 Descripción del Sistema de Alerta Temprana

La estación de alerta temprana es un sistema integrado que tiene 4 sensores que registran las condiciones medioambientales de temperatura, humedad, presión barométrica y precipitación por lluvia. Un sensor que monitorea el nivel del río. Un dispositivo GPS para referenciar geográficamente la estación. Un dispositivo de comunicación inalámbrica de tercera generación. Una cámara digital para observar las condiciones de la región en riesgo. Un panel solar y una batería para garantizar un suministro permanente e independiente de energía. Un módulo electrónico de registro y control para el almacenamiento de datos.

En las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi se recomienda la instalación de estaciones automáticas que se incorporen al sistema SCADA que posee la central hidroeléctrica San José de Minas, estas estaciones deberán ser administradas por el INAMHI. En la actualidad no existe ninguna estación automática que sirva para algún tipo de estudio hidrológico en la cuenca, los estudios se realizan mediante estaciones cercanas a estas cuencas.

4.2.5.2 Puntos de control

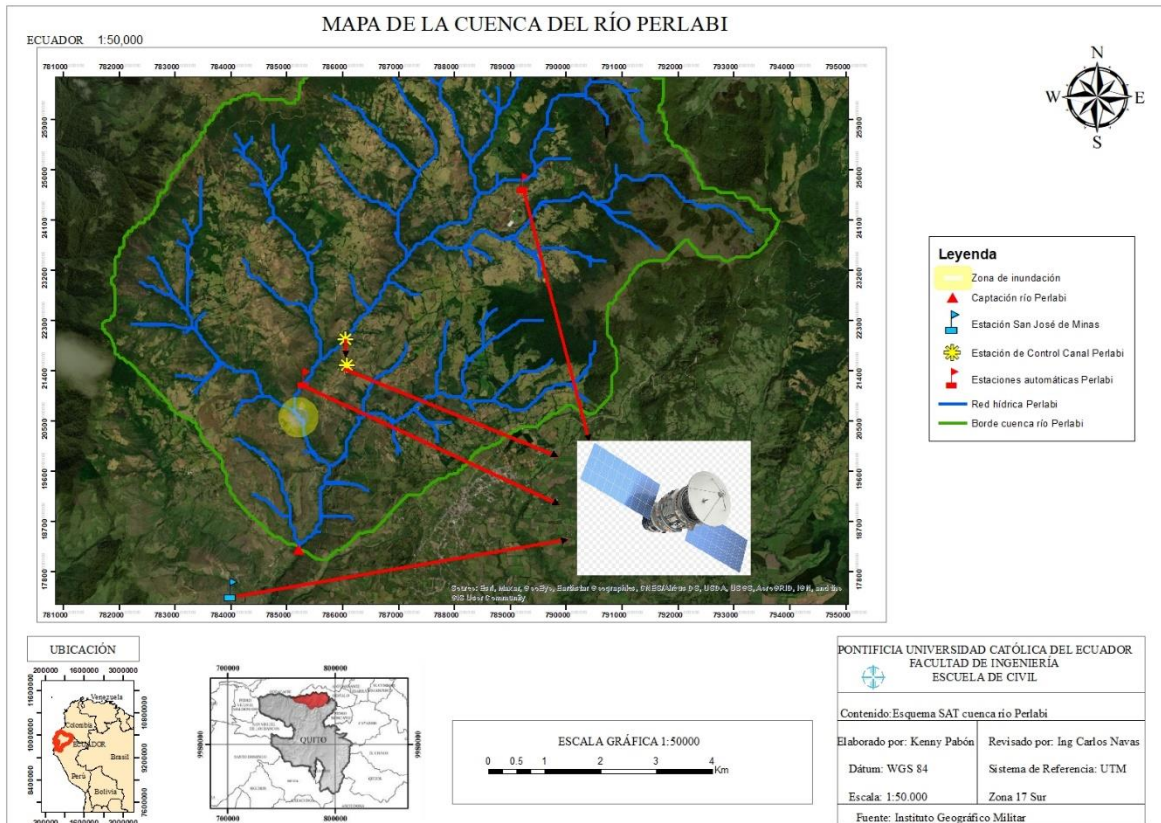
Los instrumentos de medición deben colocarse en la cabecera de la cuenca, ya que en las partes más elevadas se registra mayor precipitación, además, así se tendrá un tiempo de respuesta mayor ante un posible evento de inundación. Adicionalmente deben colocarse estaciones de control en puntos que se encuentren antes de las zonas de inundación determinadas con los modelos hidrológicos e hidráulicos. También es necesario un canal de hormigón con las dimensiones previamente analizadas construido alrededor de 1km de distancia de los puntos de captación de las centrales Perlabi y Cubi, estos canales deberán encontrarse cercanas a una residencia para establecer un punto de control y un medio de transmisión de datos efectivo. Cuando los umbrales en estos canales sean sobrepasados se activará una alarma y se estimará el tiempo que toma en que el caudal llegue hasta los puntos de captación.

Para el río Perlabi el punto de control se ubicará en las coordenadas.

- Latitud: 0°11'38.40" N
- Longitud: 78°25'48" W

A continuación, se muestra un esquema de la ubicación de las estaciones automáticas y los puntos de control del Sistema de Alerta Temprana en la cuenca del río Perlabi.

Ilustración 71. Esquema SAT cuenca del río Perlabi



Fuente: Elaboración propia, ArcGIS

Las coordenadas de las estaciones se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 32. Coordenadas de estaciones SAT Perlabi

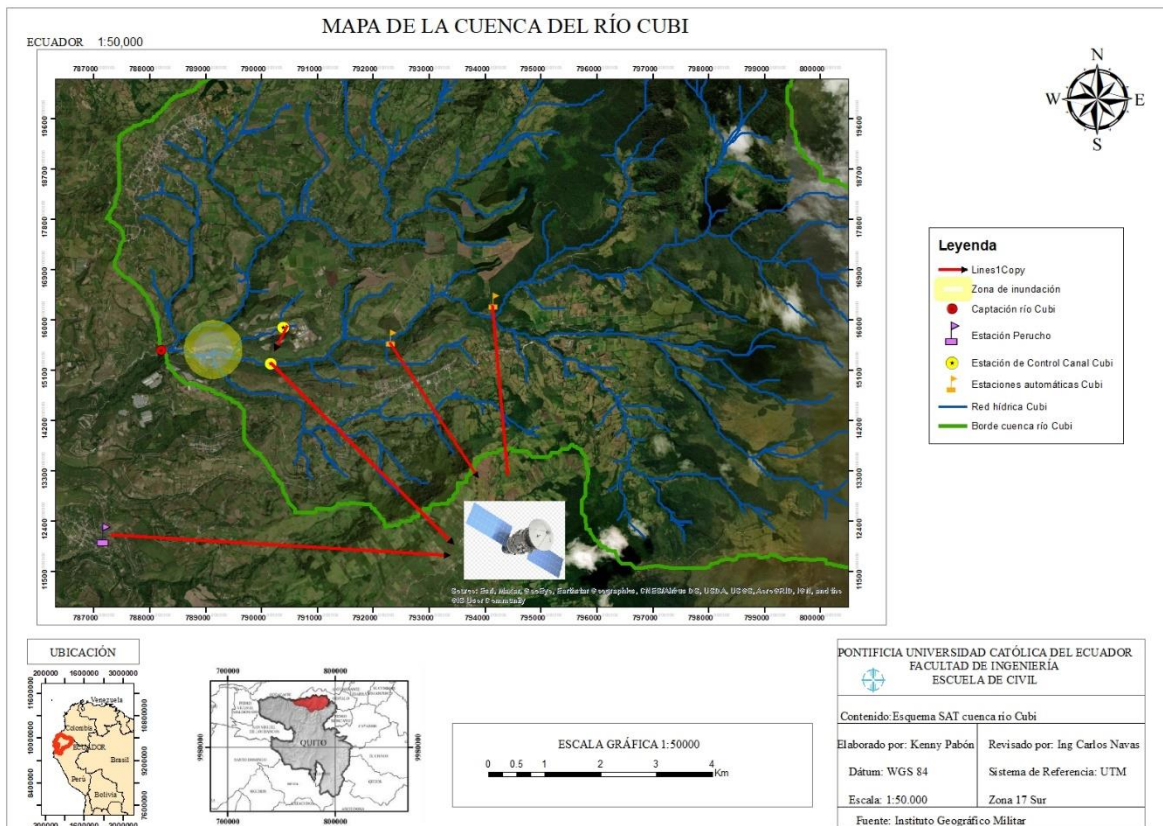
ESTACIÓN	ESTE	NORTE	ALTURA (msnm)	TIPO
Parte Alta	789232.506	24762.157	2541	Hidrométrica y Pluviométrica
Parte Baja	785295.071	21272.219	2061	
Canal	786071.53	22017.775	2135	Estación de control

Fuente: Elaboración propia, ArcGIS

Para el río Cubi el punto de control se ubicará en las coordenadas y las estaciones en las coordenadas que muestran en la tabla.

- Latitud: 0°08'34.80" N
- Longitud: 78°23'27.600" W

Ilustración 72. Esquema SAT cuenca del río Perlabi



Fuente: Elaboración propia, ArcGIS

Tabla 33. Coordenadas de estaciones SAT Cubi

ESTACIÓN	ESTE	NORTE	ALTURA (msnm)	TIPO
Parte Alta	794092.432	16265.323	2232	Hidrométrica y Pluviométrica
Parte Baja	792332.025	15679.615	1977	
Canal	790396.684	15874.238	1960	Estación de control

Fuente: Elaboración propia, ArcGIS

4.2.5.3 Medios de comunicación

Una vez configurados todos los dispositivos con los cuenta la estación de alerta temprana se activa el GPS y luego se registra en la red telefónica y comienza el monitoreo de las condiciones ambientales. Cuando se sobrepasan ciertos umbrales determinados se activan alarmas indicando a los usuarios, principalmente a las autoridades de los distritos afectados, policía nacional y bomberos sobre el peligro de la potencial ocurrencia de una inundación.

En caso de detectarse una condición de riesgo reportada por el sensor de nivel del río, se establece la condición de riesgo y se emite las alertas por llamadas telefónicas y mensajes de texto a las personas registradas en el directorio telefónico de la estación. Cuando se actualiza el sistema de almacenamiento de datos y el monitoreo web se genera una publicación en una red social como Twitter sobre las condiciones de alerta registrada.

De igual manera la estación de alerta temprana soporta el monitoreo por mensajes de texto a las terminales registrados en el directorio de la estación. Por lo que el usuario puede solicitar información acerca de la temperatura, humedad, precipitación, nivel del río y presión barométrica de cada estación.

4.2.5.4 Acciones preventivas y tiempo de alerta

Para garantizar una toma de datos confiable el registro del nivel del río y los sensores restantes se ejecuta cada minuto; las actualizaciones de nivel, temperatura, humedad, presión y precipitación se remiten al servidor cada minuto para poseer condiciones actualizadas de la estación de alerta temprana. La cámara digital se puede configurar para tomar fotografías del río en intervalos de 20 minutos y tomar videos de 1 minuto de duración para almacenarse localmente y ser revidados cuando se realice una labor de mantenimiento.

Las condiciones propias de la estación de alerta temprana también se registran y se actualizan, así, se reporta la temperatura de los componentes electrónicos como el procesador, la frecuencia del reloj, la carga del CPU y el porcentaje de memoria RAM disponible.

La transmisión de los datos desde las estaciones automáticas hacia la estación central será en tiempo real. Una frecuencia mínima de medición y transmisión de datos recomendables es de una hora, es decir cada hora se receptorá la información obtenida de todas las estaciones. La estación central recopila, procesa y analiza los datos mediante un programa proporcionado por el proveedor de los pluviómetros automáticos que permite la conversión

de las señales de los pluviómetros en milímetros de lluvia, información que es usada en el modelo hidrológico para el pronóstico de crecidas.

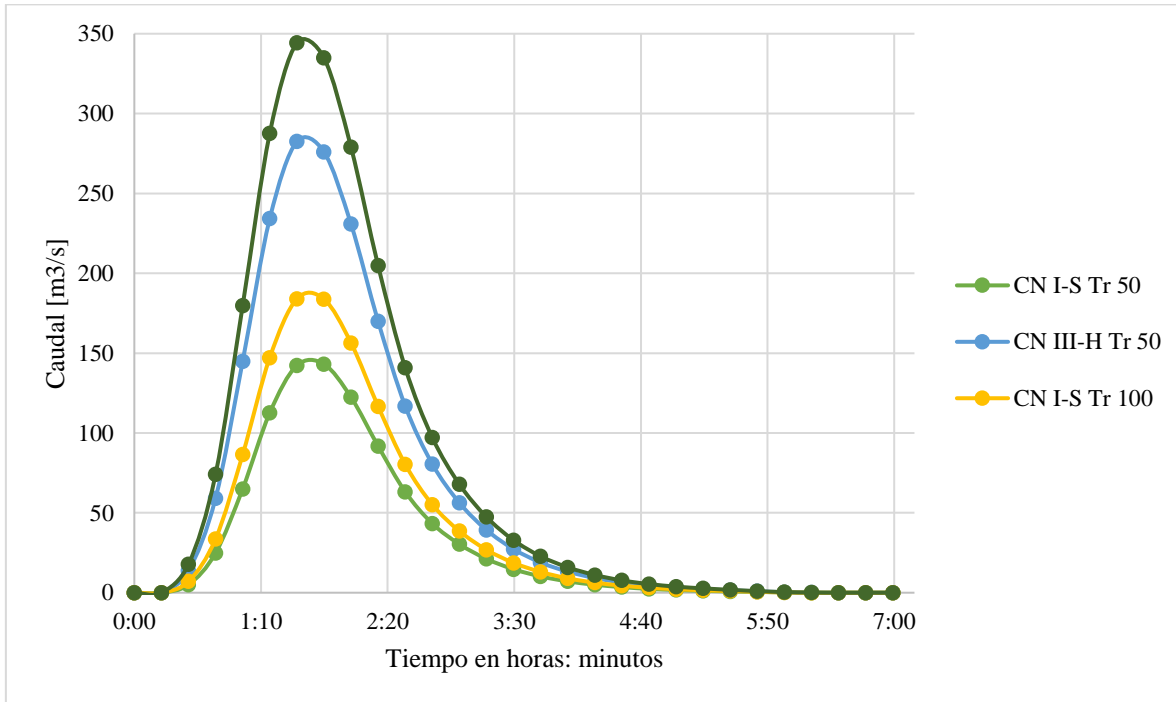
Según Garrido, 2013, el modelo de actualización en tiempo real se adopta a aquellas variables en las que se puede admitir que no existe mayor tiempo transcurrido entre el momento de su lectura y el momento de su registro en el sistema. Estas variables están asociadas a estaciones automáticas, con conexión en líneas al sistema de comunicación que integra el sistema SCADA. Si bien lo ideal sería tener todas las variables disponibles en tiempo real, esto no siempre es posible debido a los costos y a que existen fenómenos cuya variación en magnitud es tan lenta que no justifican una transmisión en tiempo real.

El sistema SCADA tiene por objetivos:

- Monitorear y controlar las variables: nivel en el cauce, escurrimiento e intensidad de la lluvia.
- Reducir los niveles de operación personal a través de la automatización o mediante la operación del sistema desde una sola sala, disminuyendo la necesidad de inspecciones rutinarias en campo.
- Almacenar los datos sobre el comportamiento de las cuencas ante la ocurrencia de lluvias intensas.
- Proveer información sobre la situación de la cuenca en cualquier instante de tiempo y establecer instrucciones efectivas para la comunicación remota con los recursos de campo.
- Establecer un sistema de alarma capaz de alertar a las principales autoridades ante una situación que pueda producir inundaciones en la cuenca.

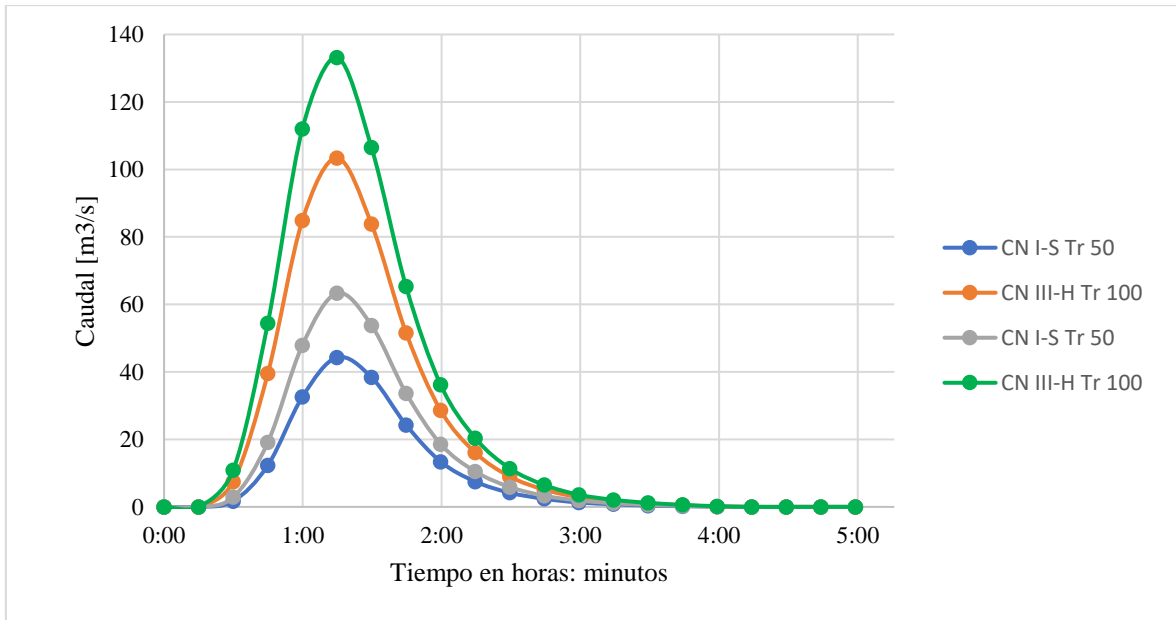
Para estimar un tiempo de respuesta adecuado se presentan los hidrogramas de crecidas para diferentes tiempos de retorno y diferentes condiciones. La curva número CN (III) modela el caudal simulado que se generó debido a la transformación de la precipitación de toda la cuenca en escorrentía directa, por lo que representa el caso más desfavorable. El tiempo de pronóstico es el que transcurre entre una precipitación y el paso del caudal generado, este tiempo se ha estimado en 1,5 horas, o lo que es lo mismo 90 minutos, para el caso más desfavorable que es el de la condición de CN(III) para un periodo de retorno de 100 años.

Ilustración 73. Hidrogramas de crecidas río Cubi



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

Ilustración 74. Hidrogramas de crecidas río Perlabi



Fuente: Elaboración propia, HEC-HMS

4.2.5.5 Costos de implementación, operación y mantenimiento del sistema de alerta temprana

A continuación, se presenta un presupuesto referencial de la instalación de un sistema de alerta temprana integrado a SCADA de previsión de avenidas, así como un presupuesto referencial de la operación y mantenimiento anual.

Tabla 34. Presupuesto Referencial de instalación de un SAT

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Subtotal(\$)
1	Obras preliminares				
1.01	Movilización y desmovilización	und	6	229.2	1375.20
1.02	Trazado y Replanteo	und	6	78.5	471
1.03	Cartel de la obra	und	6	55	330
2	Infraestructura				
2.01	Losa de concreto para estación remota	und	4	1500	6000
2.03	Cerco de protección con malla y puerta	und	4	113.52	454.08
2.04	Preparación estación central	und	2	1200	2400
2.05	Losa para caseta de grupo electrógeno	und	2	850	1700
3	Equipamiento				
3.01	Pluviómetro Automático	und	4	1650	6600
3.02	Soporte para pluviómetro	und	4	212	848
3.03	Panel solar	und	4	810	3240
3.04	GPS	und	4	590	2360
3.05	Cámara digital	und	4	86.75	347
3.06	Equipo electrónico	und	4	1400	5600
3.07	Equipamiento adicional y transmisión	und	4	5150	20600
3.08	Sistema de protección, pararrayos	und	6	150	900
3.09	Equipo de cómputo	glb	2	1850	3700
3.10	Software	glb	1	2490	2490
3.11	Montaje	glb	6	650	3900
4	Varios				
4.01	Stock básico de repuestos	glb	1	1200	1200
4.02	Herramientas de reparación	glb	1	1600	1600
4.03	Herramientas de mantenimiento	glb	1	1300	1300
COSTO TOTAL DIRECTO					67415.28

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35. Presupuesto referencial de operación y mantenimiento anual del SAT

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Subtotal
1	Local				
1.01	Alquiler de estación central	mes	12	125.00	1500.00
2	Personal				0.00
2.01	Jefe del sistema de alerta	mes	12	1625.00	19500.00
2.02	Técnico de mantenimiento	mes	12	581.00	6972.00
3	Mantenimiento de estaciones				
3.01	Movilidad	mes	12	37.77	453.18
3.02	Viáticos	mes	12	46.48	557.76
3.03	Stock adicional de repuestos	gbl	1	1100.00	1100.00
COSTO TOTAL DIRECTO					30082.94

Fuente: Elaboración propia, CELEC

5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Los sistemas de información geográfica (SIG) representan un gran conjunto de herramientas que permiten consultar y mostrar datos espaciales del mundo real. Mediante el uso del software ArcGIS y sus aplicaciones integradas se modelaron los parámetros morfométricos, la geomorfología de la superficie y de las redes hídricas de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi. Las características físicas e hidrológicas se lograron representar mediante el uso de modelos digitales de elevación (DEM), la información disponible del estudio hidrológico realizado por M. Zarria, 2018 y la base de datos del INAMHI.
- De la información disponible del estudio hidrológico de M. Zarria y de la estimación mediante HEC-HMS, los caudales máximos generados en la simulación del evento de precipitación máxima diaria son los siguientes: para un periodo de retorno de 50 años; río Perlabi, $c=44.30 \text{ m}^3/\text{s}$, río Cubi, $c=143.10 \text{ m}^3/\text{s}$; y para un periodo de retorno de 100 años, río Perlabi, $c= 63.3 \text{ m}^3/\text{s}$, río Cubi, $c=183.90 \text{ m}^3/\text{s}$.
- La conexión entre los software SIG y HEC permite procesar los datos georreferenciados y modelar con mayor exactitud las características y parámetros geomorfométricos de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi. De esta manera es posible elaborar un modelo hidrológico con la extensión HEC-HMS y un modelo hidráulico con la extensión HEC-RAS, lográndose simulaciones con muy buena aproximación para dar respuesta a un evento de crecidas.
- Para un adecuado modelamiento de las cuencas es muy importante una correcta evaluación de los parámetros de la cuenca, siendo en este caso el principal parámetro el Número de Curva (CN), al ser un parámetro muy sensible debe calibrarse adecuadamente para que sea más acorde a la realidad ya que este influye en gran medida en el hidrograma de salida de las cuencas.

- Se generaron máximas avenidas para distintos periodos de retorno, mediante los datos históricos de precipitación máxima en 24 horas del periodo 1965-2006, con los que se realizó el modelo y se obtuvieron hidrogramas de salida en los puntos de captación de los ríos Perlabi y Cubi. Al modelar estos caudales se obtuvo que se producirán inundaciones para los distintos caudales conseguidos.
- Al tener en consideración las posibles inundaciones debido a los caudales extraordinarios generados se plantea instalar un sistema automático digital integrado de alerta temprana para crecidas que cuente con estaciones hidrométricas y pluviométricas capaz de transmitir información en tiempo real en las cuencas de los ríos Cubi y Perlabi, para asistir a la población y ejecutar un plan de emergencia para evacuar la zona de una posible inundación.
- El costo estimado de la instalación de un SAT automático digital integrado asciende a los \$ 67415.28 dólares americanos; y el costo estimado de la operación y mantenimiento de este sistema de alerta temprana de inundaciones, asciende a \$30082.94 dólares americanos.

5.2 Recomendaciones

- Tener el criterio necesario para utilizar los softwares de modelamiento, ya que para la estimación de parámetros es indispensable que estos estén debidamente calibrados y así obtener un modelo con validez y se acerque a la realidad, un desconocimiento de este criterio puede desencadenar en subestimaciones o sobrestimaciones al momento de la toma de decisiones.
- Implementar más estaciones hidrométricas y pluviométricas cerca de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi, y modernizar las que de momento se encuentran en funcionamiento, para así obtener datos más confiables y poder realizar un modelamiento de la cuenca con mayor precisión, esto deberá estar a cargo de la institución encargada del manejo y control de datos meteorológicos e hidrológicos.
- Efectuar un plan de coordinación entre las instituciones delegadas al manejo y prevención de riesgos coligados a las inundaciones como la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, el Ministerio del Ambiente y Comités de Operaciones de Emergencia cantonal y provincial para la toma de decisiones que garanticen una reducción de la vulnerabilidad de la zona en estudio.
- Para obtener un modelo más acertado de las cuencas de los ríos Perlabi y Cubi se recomienda realizar una investigación de campo más exhaustiva respecto al Número de Curva (CN) y el coeficiente de Manning (n) debido a que son factores muy importantes para la simulación hidrológica e hidráulica del río.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Regulación y control de Electricidad, “Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2016,” Atlas del Sector Eléctrico. Ecuatoriano, vol. 1, p. 113, 2017.
- Armién, F. (2011). Manual Sistemas de Alerta Temprana, 10 preguntas-10 respuestas. Ministerio de Educación de Panamá.
- Campos-Aranda, D. F. (1992). Procesos del ciclo hidrológico. 2a. ed., Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos (No. 627.13 C552h). Bogotá, CO: McGraw-Hill.
- Coz, F. (1995). Manual de mini y micro centrales hidráulicas: Una guía para el desarrollo de proyectos. Lima, Perú.
- Einstein, H. A. (1950). "The bed-load function for sediment transportation in open channel flows." USDA Soil Conservation Service, Technical Bulletin No. 1026, Washington, D.C., September.
- Garrido Monagas, M., Gómez Crespo, M. R., & León Méndez, A. (2013). Sistema automatizado de alerta temprana ante el peligro de inundaciones. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 34(3), 30-43.
- Girardi Pico, Benjamín (2017). Obtención de relaciones para la aplicación del método del hidrograma unitario sintético en la zona altiplánica de la XV, I y II región de Chile.
- Ibáñez, M. (2015). Azudes o presas de derivación. La Paz, Bolivia: Escuela Militar de Ingeniería.
- INAMHI. Anuarios Meteorológicos. Quito, Ecuador.
- Jara, V., & Sebastián, J. (2015). Compuertas auto limpiantes de descarga de fondo para desarenadores en pequeñas centrales hidroeléctricas.
- Krochin, S. (1982). Diseño hidráulico. Editorial Universitaria
- López, B., Gabriel, J., & Salgado, A. Y. T. (2010). Atlas climatológico del Ecuador. (Tesis de pregrado) Escuela Politécnica Nacional.
- Miranda, J. R. O. (2016). Sistema de alerta temprana por riesgo de inundaciones debidas a desbordamiento de los niveles de ríos. (Tesis de grado) Universidad de El Salvador.

- Monsalve, G. (1999). Hidrología en la ingeniería (2da ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Moreno, F., & Esquivel J. (2015). Estudio morfométrico de la cuenca del río Azul, afluente del río Calima, Departamento del Valle del Cauca. (Tesis de grado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Ordoñez, J. (2011). Cartilla Técnica. ¿Qué es una cuenca hidrológica? Lima. Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Organización de los Estados Americanos. (2006). OEA. Recuperado el 22 de febrero de 2022, de <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea30s/ch026.htm#TopOfPage>
- Ortiz, R.; “Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Construcción Paso a Paso”; Ediciones de la U; 2011, Bogotá – Colombia;
- Quintero, B. (2009). Metodología de diseño de obras hidráulicas en estudios de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas. Quito: Universidad Politécnica Nacional.
- Ramírez, P., & Katty, K. (2019). Sistema de Alerta Temprana de Inundaciones Aplicando un Modelamiento Hidrológico con HEC-HMS en el Río Culebras.
- Reyes Aguirre M. (1965) “Curso de Máquinas Hidráulicas”, Facultad de Ingeniería U.N.A.M., México.
- Sánchez Duchicela, D. P. (2017). Evaluación del sistema de agua potable de la parroquia San José de Minas, Cantón Quito, Provincia de Pichincha (Bachelor's thesis).
- Sanz, J. F. (2008). Energías Renovables Energía Hidroeléctrica. Zaragoza: Prensas universitaria de Zaragoza.
- Sorto Perdomo, G., & Villalta Cruz, H. (2013) Implementación de una Estación Meteorológica (Tesis de pregrado) Universidad de El Salvador, Ciudad Universitaria.
- US Army Corps of Engineers. (2021). HEC-RAS. River Analysis Sistem. Hydraulic Reference Manual. Davis, California: Hydrologic Engineering Center.
- Valenzuela Mardones, C. A. (2011). Diseño y evaluación de una estructura de captación de agua mediante la implementación de mallas de efecto Coanda.

- Valle, J. (2013). Dimensionamiento del tanque de carga y tubería de presión de la micro central hidroeléctrica Juri Juri Kawsay. Quito.
- Zarria, M. (2018). *Estudio Hidrológico Proyecto Hidroeléctrico San José de Minas*. Quito.

ANEXO 2: Cálculo de las pendientes de las cuencas hidrográficas de los ríos Perlabi y Cubi

Pendiente media de la Cuenca río Perlabi

Nro.	Rango Pendiente (%)			Número de ocurrencias (2)	(1)x(2)
	Inferior	Superior	Promedio (1)		
1	0	10	5	33132	165660
2	10	20	15	110556	1658340
3	20	30	25	190248	4756200
4	30	40	35	208013	7280455
5	40	50	45	118585	5336325
6	50	60	55	19308	1061940
7	60	70	65	2262	147030
8	70	80	75	675	50625
9	80	90	85	169	14365
10	90	100	95	15	1425
Total				682963	20472365
Pendiente media de la cuenca				25.510	%

Pendiente media de la Cuenca río Cubi

Nro.	Rango Pendiente (%)			Número de ocurrencias (2)	(1)x(2)
	Inferior	Superior	Promedio (1)		
1	0	10	5	124141	620705
2	10	20	15	184534	2768010
3	20	30	25	241077	6026925
4	30	40	35	231717	8110095
5	40	50	45	266881	12009645
6	50	60	55	231219	12717045
7	60	70	65	115039	7477535
8	70	80	75	31339	2350425
9	80	90	85	4449	378165
10	90	100	95	496	47120
Total				1430892	52505670
Pendiente media de la cuenca				21.330	%

**ANEXO 3: Cálculo de las pendientes de las redes hídricas de las cuencas de los ríos
Perlabi y Cubi**

Pendiente de la red hídrica cuenca río Perlabi			
Orden	Nro. Veces (1)	Pendiente Promedio (2)	(1)x(2)
1	4356	2.723	11861.388
2	2888	2.194	6336.272
3	2099	1.727	3624.973
4	327	1.217	397.959
5	785	1.203	944.355
Total	10455	9.064	23164.947
Pendiente Promedio		2.22	%

Pendiente de la red hídrica cuenca Río Cubi			
Orden	Nro. Veces (1)	Pendiente Promedio (2)	(1)x(2)
1	11923	2.106	25109.838
2	6256	1.877	11742.512
3	5048	1.402	7077.296
4	1453	1.542	2240.526
5	1480	1.203	1780.44
6	7	1	7
Total	26167		47957.612
Pendiente Promedio		1.83	%

ANEXO 4: Resultados HEC-HMS para elaboración de hidrogramas

Cuenca río Cubi

TR 50 años	CN I S (mm)	CN III H (mm)
0:00	0	0
0:15	0	0
0:30	5	13.9
0:45	24.9	59.2
1:00	65	144.9
1:15	112.6	234.2
1:30	142.2	282.5
1:45	143.1	276
2:00	122.4	230.8
2:15	91.8	169.9
2:30	63.2	116.9
2:45	43.3	80.6
3:00	30.4	56.3
3:15	21.2	39.3
3:30	14.7	27.3
3:45	10.2	18.9
4:00	7.1	13.2
4:15	5	9.2
4:30	3.5	6.4
4:45	2.4	4.5
5:00	1.7	3.2
5:15	1.2	2.2
5:30	0.8	1.5
5:45	0.5	0.9
6:00	0.2	0.3
6:15	0	0.1
6:30	0	0
6:45	0	0
7:00	0	0

Cuenca río Cubi

TR 100 años	CN I S (mm)	CN III H (mm)
0:00	0	0
0:15	0	0
0:30	7.1	17.8
0:45	33.7	74.2
1:00	86.5	179.8
1:15	147.2	287.6
1:30	183.9	344.3
1:45	183.8	334.9
2:00	156.4	278.9
2:15	116.7	204.8

2:30	80.4	140.9
2:45	55.2	97.2
3:00	38.6	67.9
3:15	26.9	47.4
3:30	18.7	32.9
3:45	13	22.8
4:00	9	15.9
4:15	6.3	11.1
4:30	4.4	7.7
4:45	3.1	5.4
5:00	2.2	3.8
5:15	1.5	2.7
5:30	1.1	1.8
5:45	0.6	1
6:00	0.2	0.4
6:15	0	0.1
6:30	0	0
6:45	0	0
7:00	0	0

Cuenca Río Perlabi

TR 50 años	CN I S (mm)	CN III H (mm)
0:00	0	0
0:15	0	0
0:30	1.7	7.5
0:45	12.3	39.5
1:00	32.6	84.9
1:15	44.3	103.4
1:30	38.4	83.8
1:45	24.3	51.6
2:00	13.4	28.6
2:15	7.5	16.1
2:30	4.2	9
2:45	2.4	5.1
3:00	1.3	2.9
3:15	0.8	1.6
3:30	0.4	0.9
3:45	0.2	0.5
4:00	0.1	0.1
4:15	0	0
4:30	0	0
4:45	0	0
5:00	0	0

Cuenca río Perlabi

TR 100 años	CN I S(mm)	CN III H(mm)
0:00	0	0
0:15	0	0
0:30	2.9	10.9
0:45	19.1	54.4
1:00	47.9	112
1:15	63.3	133.2
1:30	53.8	106.5
1:45	33.7	65.3
2:00	18.6	36.2
2:15	10.5	20.4
2:30	5.9	11.4
2:45	3.3	6.5
3:00	1.9	3.6
3:15	1.1	2.1
3:30	0.6	1.2
3:45	0.3	0.6
4:00	0.1	0.2
4:15	0	0
4:30	0	0
4:45	0	0
5:00	0	0